



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

GEOVANA ROCHA DE FIGUEIREDO SANTOS

# **IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS DA BACIA DO RIO DESCOBERTO**

BRASÍLIA,  
NOVEMBRO DE 2019

GEOVANA ROCHA DE FIGUEIREDO SANTOS

## **IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS DA BACIA DO RIO DESCOBERTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Engenheira Florestal.

BRASÍLIA,  
DEZEMBRO DE 2019

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

RIM34i Rocha de Figueiredo Santos, Geovana  
Impacto das Mudanças Climáticas nas Variáveis Hidrológicas  
da Bacia do Rio Descoberto / Geovana Rocha de Figueiredo  
Santos; orientador Henrique Marinho Leite Chaves. --  
Brasília, 2019.  
69 p.

Monografia (Graduação - Engenharia Florestal) --  
Universidade de Brasília, 2019.

1. Mudanças climáticas. 2. modelagem hidrológica. 3.  
produção de água. 4. bacia do Descoberto. I. Marinho Leite  
Chaves, Henrique, orient. II. Título.



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

## **IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS DA BACIA DO RIO DESCOBERTO**

Estudante: Geovana Rocha de Figueiredo Santos

Matrícula: 13/0112232

Orientador: Prof. Dr. Henrique Marinho Leite Chaves (EFL/UnB)

Menção: \_\_\_\_\_

---

Prof. Dr. Henrique Marinho Leite Chaves  
Universidade de Brasília  
Departamento de Engenharia Florestal  
Orientador

---

MSc. Edson Rodrigo Toledo Neto  
Ministério da Fazenda, Secretaria de Política Econômica  
Membro da banca examinadora

---

Thaiane Vanessa Meira Nascente dos Santos  
Engenheira Florestal  
Universidade de Brasília  
Membro da banca examinadora

BRASÍLIA,  
DEZEMBRO DE 2019

## AGRADECIMENTOS

Agradeço as pessoas que compartilham a trajetória acadêmica comigo, tornando todo esse processo muito mais leve. Direciono o agradecimento especial a algumas amigas que estão prestes a concluir o curso (Babi, Lauana, Yasmin, Carol, e Mari Bittencourt). Nós somos guerreiras, fortes e corajosas por todas as etapas que passamos. E tudo vai dar certo! Um agradecimento especial também para as amigas formadas que compartilham suas experiências de vida após a conclusão do curso (Natanna, Joce, Joanna, Winnie, Ana Braga, Paola e Grazi) Desejo um mundo de portas sempre abertas na vida de vocês, companheiras floresteiras.

Aos amigos de vida, viagens, biblioteca e cafezinhos, que me dão suporte em todos os momentos da minha vida (Amanda Holgado, Felipe Titi, Amandda Cavalcante, Jessica, Thomaz e Renato). Obrigada por todos os puxões de orelha e conselhos pertinentes que me fazem ser uma pessoa melhor a cada dia.

Agradeço à Dona Nely e ao Seu Clarindo (*in memoriam*), que vieram à Brasília em busca de melhores oportunidades de vida, construindo sua família e garantindo que nada faltasse para que seus filhos concluíssem seus estudos. A eles, e a tantos imigrantes que deixaram o Nordeste e ajudaram na construção de Brasília, cidade essa que me acolhe e acolheu minha família: meu mais sincero e afetivo muito obrigada. Desse modo, os agradecimentos à toda minha família estão centrados no agradecimento a minha avó e ao meu avô, afinal, toda a história da família só aconteceu graças à coragem destes dois.

Agradeço à equipe da Cooperação Alemã para o Desenvolvimento Sustentável (GIZ-GmbH) por terem me ensinado tanto sobre a vida profissional e relações de trabalho. Em especial Maurício Boff, Fabiana Pironi, Wolf Hartmann, Ariane Cassoli, Jorge Spinoza, Rogério Cabral, Dini Silveira e Elisa de Siqueira. Vivi momentos de muito crescimento pessoal e profissional durante o período que trabalhei com vocês, sou eternamente grata por todos os conselhos e ensinamentos que vocês compartilharam comigo.

Agradeço à Flávia Paula do setor administrativo do departamento de Engenharia Florestal, por seu profissionalismo e sempre disposição para atender aos estudantes da graduação com carinho e atenção especial. À Marinalva Silva, copeira da Faculdade de Tecnologia, sou grata pelas palavras de motivação acompanhadas de um delicioso cafezinho na hora do almoço. A todos os servidores da Universidade de Brasília – professores, técnicos, servidores, serviços gerais - vocês são fundamentais para fazer a nossa universidade funcionar bem e ser esse ambiente tão maravilhoso, diverso, complexo, mas ao mesmo tempo muito agradável.

Agradeço ao meu orientador Henrique Marinho Leite Chaves por termos trabalhado juntos ao longo deste semestre, através da orientação ao meu trabalho de conclusão de curso e pela monitoria de manejo de bacias. Admiro seu profissionalismo, dedicação e cooperação. Grata pelo apoio e pelas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço enormemente ao Engenheiro Florestal Edson Toledo e a Engenheira Florestal Thaiane Meira por terem aceitado o convite de fazerem parte da banca examinadora do presente trabalho.

*“ (...) Acho que as águas iniciam os pássaros  
Acho que as águas iniciam as árvores e os peixes  
E acho que as águas iniciam os homens.  
Nos iniciam.  
E nos alimentam e nos dessedentam.  
Louvo esta fonte de todos os seres, de todas as plantas, de todas as  
pedras.  
Louvo as natências do homem do Pantanal.  
Todos somos devedores destas águas.  
Somos todos começos de brejos e de rãs.  
E a fala dos nossos vaqueiros carrega murmúrios destas águas.  
Parece que a fala de nossos vaqueiros tem consoantes líquidas  
E carrega de umidez as suas palavras.  
Penso que os homens deste lugar  
são a continuação destas águas.”*

(Manoel de Barros)

## RESUMO

O presente trabalho visa avaliar o impacto das mudanças climáticas nas principais variáveis hidrológicas na bacia do Rio Descoberto. Para tanto, foi realizada uma compilação das estimativas de precipitação (P) e temperatura (T) geradas por um conjunto de 16 modelos globais de circulação geral (GCMs), da 5ª fase do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5), para o período entre 2020 a 2039. Os cenários futuros foram comparados com o período recente, tomado como linha de base (1991 a 2016), cuja fonte de dados utilizada foi gerada pela *Climate Research Unit* (CRU), da Universidade de East Anglia (EUA). O impacto das mudanças climáticas foi estimado em 4 cenários de emissões (RCPs) de gases do efeito estufa (GEE), sendo classificados em uma escala que vai do cenário otimista (2.5), cenários intermediários (4.5 e 6.0) e cenário pessimista (8.5). A média de P e T dos 16 modelos GCMs foi utilizada para as estimativas. Para a obtenção do escoamento total na bacia nos distintos cenários, foi aplicado o modelo de Gardner (2009), e o de evapotranspiração de Holland (1975). Os resultados encontrados apontam para um acréscimo médio de 5,9% na temperatura média anual da bacia, e de uma redução média de 14,35% na precipitação anual. O escoamento total futuro na bacia seria reduzido em 15% (em média), em comparação com a média do *baseline*. Além disso, foi realizada uma análise sazonal para precipitação e temperatura média mensal gerada pelos GCMs, indicando possível aumento da temperatura para todos os meses e algumas incertezas quanto ao comportamento da variável precipitação gerada pelos 16 GCMs utilizados.

**Palavras-Chave:** *Mudanças climáticas, modelagem hidrológica, produção de água, bacia do Descoberto.*

## ABSTRACT

This paper aims to evaluate the impact of climate change on the main hydrological variables in the Descoberto River basin. For this purpose, a precipitation (P) and temperature (T) estimate was compiled from a set of 16 global circulation models (GCMs) from the 5th phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) for the period between 2020 to 2039. Future scenarios are mixed compared to the recent period, taken as the baseline (1991 to 2016), whose data source used was generated by the Climate Research Unit (CRU) of the University of East Anglia (USA). The impact of climate change has been estimated on 4 greenhouse gas (GHG) emission scenarios (RCPs), being rated on a scale ranging from the optimistic scenario (2.6), intermediate scenarios (4.5 and 6.0) and pessimistic scenario (8.5). The mean P and T of the 16 GCM models was used for the estimates. In order to obtain the total flow in the basin, in different scenarios, Gardner's model (2009) and Holland's evapotranspiration model (1975) were applied. The results indicate an average increase of 5.9% in the average annual temperature of the basin, and an average reduction of 14.35% in annual precipitation. Future average annual runoff in the basin would be reduced by 15% (on average) compared to the baseline average. In addition, a seasonal analysis was performed on the monthly average precipitation and temperature generated by the GCMs, indicating a possible temperature increase for all months and some uncertainties regarding the behavior of the precipitation variable generated by the 16 GCMs used.

**Keywords:** *Climate change, hydrological modeling, water production, Descoberto River basin*



## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE SIGLAS .....</b>	<b>xiii</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
2.1 Objetivo geral.....	15
2.2 Objetivos específicos .....	15
<b>3. JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>15</b>
<b>4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
4.1 Processos hidrológicos na bacia hidrográfica .....	16
4.2 Variabilidade, Mudança Climática e os Recursos Hídricos.....	19
4.2.1 Modelos Gerais de Circulação .....	21
4.2.2 Cenários de Mudanças Climáticas.....	22
4.3 Crise Hídrica no DF e impactos na Bacia do Rio Descoberto .....	24
4.4 Adaptação às mudanças climáticas .....	27
4.4.1 Vulnerabilidade e incertezas .....	27
4.4.2 Adaptação baseada em ecossistemas.....	30
<b>5. METODOLOGIA .....</b>	<b>32</b>
5.1 Caracterização da área de estudo .....	32
5.1.1 Localização e delimitação da bacia .....	32
5.1.2 Rede de drenagem .....	32
5.1.3 Solos .....	33
5.1.4 Uso e cobertura do solo.....	35
5.1.5 Relevo .....	36
5.2 Obtenção e análise de dados .....	37
5.2.1 Análise de séries históricas .....	37
5.2.2 Modelos de projeção climática.....	38
5.2.3 Modelos Hidrológicos .....	40
5.2.4 Procedimentos e etapas .....	41
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>43</b>
6.1 Análise das séries históricas no <i>baseline</i> .....	43
6.1.1 Temperatura média anual.....	43
6.1.2 Precipitação média anual.....	44
6.2 Aplicação dos Modelos Hidrológicos no <i>baseline</i> .....	45

6.2.1 Escoamento total anual histórico .....	45
6.2.2 Evapotranspiração potencial média anual histórica .....	46
6.2.3 Evapotranspiração de referência histórica .....	47
6.4 Análise sazonal no <i>baseline</i> .....	49
6.5 Análise das estimativas geradas pelos GCMs .....	51
6.5.1 Temperatura média anual projetada .....	51
6.5.2 Precipitação média anual projetada .....	52
6.6 Aplicação dos Modelos Hidrológicos.....	53
6.6.1 Escoamento total anual estimado .....	53
6.6.2 Evapotranspiração potencial média anual estimada .....	54
6.6.3 Evapotranspiração de referência média anual estimada.....	55
6.7 Análise sazonal para o período 2020-2039 .....	56
<b>7. CONCLUSÕES .....</b>	<b>61</b>
<b>8. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>62</b>
<b>9. APÊNDICES .....</b>	<b>67</b>
9.1 Apêndice A .....	67

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Emissões de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) para os diferentes caminhos de concentração representativos (RCPs), em comparação com as emissões históricas .....	24
<b>Figura 2</b> - Entradas anuais ( $X_t$ ), demandas ( $D_t$ ) e armazenamentos ( $St$ ) do reservatório do Descoberto (1986-2017) .....	25
<b>Figura 3</b> - Variação do consumo médio per capita de água (L/hab./dia) para o Distrito Federal entre 1995 e 2015. ....	26
<b>Figura 4</b> - Conceitos-chaves abordados no AR5 (IPCC). Associação entre desastres, vulnerabilidade e exposição como intensificadores do risco aos impactos gerados pela mudança do clima .....	28
<b>Figura 5</b> - Localização da bacia do Rio Descoberto. ....	32
<b>Figura 6</b> - Hidrografia da Bacia do Rio Descoberto.....	33
<b>Figura 7</b> - Classes de Solo na Bacia do Rio Descoberto .....	34
<b>Figura 8</b> - Uso e cobertura do solo na Bacia do Rio Descoberto .....	36
<b>Figura 9</b> - Hipsometria na Bacia do Rio Descoberto .....	36
<b>Figura 10</b> - Localização das coordenadas de entrada para obtenção dos dados climáticos no CCKP .....	37
<b>Figura 11</b> - Fluxograma com as etapas utilizadas na metodologia .....	42
<b>Figura 12</b> - Temperaturas médias anuais no <i>baseline</i> .....	44
<b>Figura 13</b> - Precipitação média anual no <i>baseline</i> .....	45
<b>Figura 14</b> – Escoamento total anual estimado no <i>baseline</i> .....	46
<b>Figura 15</b> - ETP anual média estimada no <i>baseline</i> .....	47
<b>Figura 16</b> - $ET_0$ média anual estimada no <i>baseline</i> .....	48
<b>Figura 17</b> - Precipitação e temperatura mensais no <i>baseline</i> (1991-2016) .....	50
<b>Figura 18</b> - Temperatura média anual das projeções comparadas com o <i>baseline</i> ..	51
<b>Figura 19</b> - Precipitação média anual das projeções comparadas com o <i>baseline</i> ..	52
<b>Figura 20</b> – Escoamento total anual estimado do <i>baseline</i> e das projeções geradas pelos diferentes RCPs .....	53
<b>Figura 21</b> - Variações no escoamento total anual nos diferentes cenários RCPs ....	54
<b>Figura 22</b> - ETP média anual estimada do <i>baseline</i> em comparação com as projeções geradas pelos diferentes RCPs.....	55
<b>Figura 23</b> - $ET_0$ média anual estimada do <i>baseline</i> em comparação com as projeções geradas pelos diferentes RCPs.....	55
<b>Figura 24</b> – Temperatura média mensal ( $^{\circ}C$ ) estimada pelos modelos climáticos para o período (2020-2039) .....	59
<b>Figura 25</b> - Precipitação média mensal (mm) estimada pelos modelos climáticos para o período (2020-2039) .....	60

**LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 1</b> - Caminhos Representativos de Concentração (RCPs) .....	23
<b>Tabela 2</b> - Ações recentes de adaptação no setor público e privado . ....	29
<b>Tabela 3</b> - Área e proporção das diferentes classes de solo presentes na bacia do Rio Descoberto .....	33
<b>Tabela 4</b> - Área e proporção das diferentes classes de uso do solo presentes na Bacia do Rio Descoberto .....	35
<b>Tabela 5</b> - Modelos do CMIP5 .....	39
<b>Tabela 6</b> - Períodos de ocorrência de El-niño e intensidade dos eventos .....	49
<b>Tabela 7</b> - Medidas de dispersão para a variável temperatura (°C) .....	58
<b>Tabela 8</b> - Medidas de dispersão para a variável precipitação (mm) .....	59

## LISTA DE SIGLAS

AbE - Adaptação baseada em Ecossistemas

ANA – Agência Nacional de Águas

AR5 - Quinto Relatório de Avaliação do IPCC

CAESB - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal

CCKP - *Climate Change Knowledge Portal*

CODEPLAN - Companhia de Planejamento do Distrito Federal

COP 21- Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas de 2015

CMIP - *Coupled Model Intercomparison Project*

CRU - Unidade de Pesquisas Climáticas, da Universidade de East Anglia (EUA)

GCM – *General Circulation Models*

GEE – Gases de Efeito Estufa

ICLEI - *Local Governments for Sustainability*

IPCC – Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas

PNA - Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima

RCP – Caminhos de concentração representativas

SRES - Relatório Especial sobre Cenários de Emissões do IPCC

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

TNC – *The Nature Conservancy*

UNFCCC - Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

WGI – Grupo de Trabalho I do IPCC

WGII – Grupo de Trabalho II do IPCC

WCRP - *World Climate Research Programme*

WWF - *World Wide Fund for Nature*

## 1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais podem gerar acentuados impactos para o setor de recursos hídricos, pois estas podem modificar os padrões da precipitação, vazão e evapotranspiração, alterando a variabilidade natural destes sistemas (Tucci, 2002). Quando a variabilidade natural dos sistemas é alterada, pode ocorrer a maior probabilidade e severidades de extremos climáticos, como secas e cheias.

Segundo D'oria et al (2018) a análise da variabilidade climática é comumente realizada em estudos que utilizam dados de séries temporais de precipitação e temperatura, sendo esta a abordagem mais reconhecida para realizar projeções futuras climáticas. Somado a tal abordagem, a utilização de modelos climáticos baseados em processos físicos vêm sendo amplamente empregados para a realização de projeções futuras. Tais modelos baseiam-se na resposta de diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa (GEE).

Os Modelos Gerais de Circulação (*General Circulation Models* - GCMs), são resultantes de uma estrutura colaborativa projetada para aprimorar o conhecimento das mudanças climáticas, denominada *Coupled Model Intercomparison Project*, do *World Climate Research Programme* (WCRP) que atualmente encontra-se em sua 6ª fase (CMIP6). Os modelos do CMIP5 são úteis para entender a evolução futura do clima global.

Os modelos do CMIP6 baseiam-se numa cenarização que leva em consideração o histórico evolutivo de diversos fatores, como emissão de gases, concentração de GEE, e informações do tipo da cobertura terrestre. Tais cenários são denominados Caminhos Representativos de Concentração (RCPs) e são classificados em 4 categorias: cenário otimista (RCP 2.6), intermediários (RCP 4.5 e RCP 6.0) e cenário pessimista (RCP 8.5).

O presente trabalho realizou a análise das previsões geradas por um conjunto de 16 modelos do CMIP5 para as variáveis precipitação e temperatura para o período futuro de 2020-2039. Foram considerados os 4 cenários de RCPs (2.6, 4.5, 6.0 e 8.5), visando observar o impacto gerado pelas mudanças climáticas na vazão, precipitação, evapotranspiração de referência e evapotranspiração potencial na bacia do Rio Descoberto, utilizando a modelagem hidrológica proposta por Gardner (2009).

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O objetivo geral do presente estudo foi avaliar o efeito das mudanças climáticas nos regimes de precipitação, vazão e evapotranspiração na bacia do Rio Descoberto a partir do emprego de modelos gerais de circulação.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Obter as médias atuais (*baseline*) de P e T da bacia do Descoberto, usando os dados do *Climate Research Unit* (CRU), da Universidade de East Anglia (EUA);
- Obter as médias das previsões de P e T de 16 modelos climáticos (GCMs), em quatro cenários de emissões (RCPs) para o período entre 2020-2039 para a bacia;
- Obter, a partir dos dados anuais de P e T, a evapotranspiração potencial e o escoamento total da bacia
- Comparar os valores estimados de escoamento total nos cenários atual e futuro para a bacia;
- Analisar o efeito sazonal para as variáveis precipitação e temperatura geradas pelas previsões dos 16 GCMs para a bacia do Rio Descoberto.

## **3. JUSTIFICATIVA**

O Distrito Federal recentemente enfrentou uma grave crise hídrica centrada no sistema de abastecimento do reservatório do Descoberto, que atingiu os mais baixos valores de armazenamento desde sua entrada em operação. A precipitação média anual durante os anos de 2015 e 2017 apresentou valores muito abaixo do registrado na média histórica. As baixas entradas e a crescente demanda por água são os principais fatores responsáveis pelo desencadeamento da referida crise.

Devido ao fato de que as mudanças climáticas geram acentuados impactos para o setor de recursos hídricos modificando os padrões da precipitação, vazão e evapotranspiração; a melhor compreensão entre a variação do padrão das variáveis hidrológicas e a correlação destas com as mudanças climáticas, torna-se de grande relevância em estudos a nível de Bacia. Nesse sentido, foi escolhido a área total da

bacia do Rio Descoberto para a análise de mudanças climáticas globais, a partir do emprego de modelos climáticos e hidrológicos para a região de interesse.

#### **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

##### **4.1 Processos hidrológicos na bacia hidrográfica**

A bacia hidrográfica é o ambiente fundamental para análise do ciclo hidrológico, principalmente em sua fase terrestre onde estão incorporados os processos de infiltração e escoamento superficial (Silveira, 2001). No âmbito da implementação de políticas públicas, a bacia é definida como uma unidade territorial criada para facilitar a gestão, o planejamento e o manejo. (Brasil, 1997)

Os processos ocorrentes na bacia hidrográfica são classificados com base na direção do fluxo na bacia, podendo ser verticais ou longitudinais. Tucci (2002a, p. 30) define que o processo vertical é composto pelos seguintes componentes: precipitação, evapotranspiração, umidade e fluxo no solo. O fluxo longitudinal é composto pelo escoamento superficial.

O fluxo no sentido longitudinal tende a ser positivo (sendo representado pela precipitação menos evaporação), o que resulta no fluxo das vazões de rios para os oceanos. Já o fluxo no sentido vertical tende a ser negativo nos oceanos, pois ocorre maiores taxas de evaporação do que de precipitação.

Esse excedente de precipitação nos oceanos desloca-se na direção dos continentes e depois é precipitado. A água que vem dos oceanos é então reciclada em média 2,7 vezes sob a terra, sob ação resultante do processo entre a precipitação e a evaporação, e posteriormente retorna a escoar na direção dos oceanos (Hutjes et al. 1998 *apud* Tucci 1997).

A interconexão entre solo, vegetação e atmosfera possui grande correlação com os processos existentes no ciclo hidrológico. Quando ocorre precipitação, parte do volume inicial de chuva é retido pela vegetação, e posteriormente é evaporado por completo. Após a evaporação, as plantas perdem umidade para o meio ambiente pela transpiração, além de retirarem umidade do solo através das raízes. Neste sentido, a evapotranspiração é compreendida como o processo de evaporação somado ao processo de transpiração.



A água após precipitada possui dois caminhos: a infiltração e o escoamento superficial. A capacidade de infiltração é uma característica dependente das propriedades físicas do solo; tais como textura, porosidade e umidade antecedente, mas também é influenciada pela classe de uso do solo. Além disso, a infiltração correlaciona-se com a quantidade de escoamento superficial. Solos cobertos com vegetação nativa costumam ter altas taxas de infiltração, e em contrapartida, a quantidade de escoamento superficial é reduzida (Pritchett, 1979).

O escoamento superficial é a fase mais importante em engenharia, pois é a fase que abrange a ocorrência e transporte de água na superfície terrestre (Pruski et al, 2001). A maioria dos estudos hidrológicos está relacionada ao aproveitamento da água superficial e aos fenômenos provocados pelo deslocamento, como erosão e transporte de sedimentos.

Tucci (2002) destaca que em solos com ausência de cobertura vegetal e sobre ação de compactação, a capacidade de infiltração tende a diminuir, aumentando o escoamento superficial. Arcova e Cicco (1997) salientam que, nas microbacias de uso agrícola, quando comparadas às de uso florestal, o transporte de sedimentos e a perda de nutrientes são maiores.

Chaves e Piau (2008) estudaram o efeito da variabilidade da precipitação e do uso e manejo do solo sobre o escoamento superficial e o aporte de sedimentos da Bacia do Pipiripau, localizada no Distrito Federal. Os resultados encontrados pelos autores apontam que no uso do solo do tipo plantio convencional, o escoamento e o aporte de sedimentos tendem a aumentar exponencialmente com o aumento da precipitação.

A precipitação, evapotranspiração e o escoamento total são as principais variáveis atuantes no ciclo hidrológico. Este trabalho fará um panorama do efeito de modelos de projeção climática sob estas variáveis, visando observar como o aumento da temperatura influenciará na produção de água em cenários futuros. Algumas incertezas estão relacionadas nestas previsões e modelagens, tais quais serão abordadas nas seções seguintes.

Diante deste cenário de incertezas, a definição dos conceitos de *variabilidade hidrológica* e *variabilidade climática* se fazem necessárias. A *variabilidade climática*

será discutida no tópico que aborda a temática do efeito das mudanças climáticas sob os recursos hídricos.

A variabilidade hidrológica é estudada no âmbito de bacias, buscando compreender como as mudanças hidrológicas ocorrem. Esta é controlada por elementos como litologia, solos, cobertura vegetal e por fatores climáticos como precipitação, incidência solar e evaporação. (Tucci, 2002 b)

Segundo Tucci (2002a, p. 11) a variabilidade hidrológica pode ser compreendida como:

“Variabilidade hidrológica são as alterações que possam ocorrer na entrada e saídas dos sistemas hidrológicos. As principais entradas são a precipitação e a evapotranspiração (que depende de outras variáveis climáticas), enquanto a principal variável de saída são o nível e a vazão de um rio.

Os principais efeitos da variabilidade hidrológica estão relacionados com (a) a variabilidade natural dos processos climáticos; (b) o impacto das mudanças climáticas e (c) efeitos do uso da terra e alteração dos sistemas hídricos.”

O autor destaca que as variáveis de entrada e de saída não apresentam comportamento linear, pois quando a precipitação é alterada, há tendências de ocorrer impactos e alterações com respostas distintas na vazão da bacia. Tucci (2002) simplifica estas relações exemplificando o que ocorre em anos úmidos, onde aumentando-se a precipitação, aumenta-se a vazão (diminuindo a evapotranspiração e aumentando o escoamento). O contrário ocorre em anos secos, com baixas taxas de precipitação (neste caso, a evapotranspiração aumenta, diminuindo o escoamento).

O Bioma Cerrado é conhecido por ter grande variabilidade hidrológica no que tange a produção hídrica. (Lima, 2011), fato que, segundo o autor, reflete também na distribuição espacial das chuvas na região. Neste mesmo estudo, que aborda a situação e perspectiva sobre as águas do Cerrado, Lima (2011) concluiu que a região do Cerrado possui elevada representatividade em relação à contribuição da produção de água gerada para a maioria das bacias do país, validando o codinome pelo qual o bioma é conhecido: “o berço das águas do Brasil”. Os recursos hídricos no Cerrado, deste modo, apresentam importância que ultrapassam as dimensões deste bioma.

Hoffmann e Jackson (2000), buscaram avaliar o que pode ocorrer com o clima regional de savanas tropicais caso sejam convertidas em pastagens. Os autores

conduziram um estudo em cinco savanas tropicais distribuídas pelo globo, incluindo a região do Cerrado brasileiro. Os resultados encontrados pelos autores apontam que a conversão de savanas em pastagens pode reduzir a precipitação em aproximadamente 10% em quatro das cinco savanas que foram analisadas; e a temperatura média no ar possui tendência em um aumento de  $0,58^{\circ}\text{C}$  em todas as regiões.

Ainda segundo Hofmann e Jackson (2000), ocorre um ciclo de reação entre clima e vegetação, onde os impactos das atividades humanas na vegetação respondem substancialmente à diminuição da precipitação nessa região. Os autores refutam que para a região do Cerrado, caso ocorra uma conversão de paisagens naturais em pastagens, é esperada uma diminuição na precipitação de  $-151\text{mm/ano}$  e uma tendência ao aumento de aproximadamente  $+0,73^{\circ}\text{C/ano}$ .

#### **4.2 Variabilidade, Mudança Climática e os Recursos Hídricos**

O termo “mudanças climáticas” possui bastante enfoque nas discussões atuais, no âmbito de políticas públicas, no setor produtivo e no meio acadêmico. É evidente que este é um tema cujos efeitos afetam a vida de todos, pois algumas evidências sobre as mudanças climáticas são perceptíveis sobretudo a partir da alteração de alguns padrões climatológicos perceptíveis, cotidianamente, em uma microescala. Entretanto, é importante obtermos uma definição concisa sobre os conceitos que envolvem mudanças climáticas, principalmente para evitarmos mal-entendidos em relação a outros termos semelhantes que se confundem com o que é, de fato, mudanças climáticas em si.

Segundo a definição do Terceiro Relatório de Avaliação (AR3) do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2001), o termo *mudança climática* é definido como “as mudanças de clima no tempo devido à variabilidade natural e/ou resultado das atividades humanas (ações antrópicas)”. A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, 2015), define a expressão como “mudanças associadas direta ou indiretamente à atividade humana que alterem a variabilidade climática natural observada num determinado período”.

De acordo com o Quinto Relatório de Avaliação (AR5) do IPCC (IPCC, 2014), uma das principais causas do aquecimento global estão relacionadas às atividades

humanas e, em particular, à emissão de gases de efeito estufa. O objetivo estabelecido durante a 21ª sessão da Conferência das Partes (COP21) da UNFCCC, é limitar o aquecimento global a menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais e buscar esforços para limitar o aumento da temperatura para 1,5°C.

Para além dos termos de mudanças climáticas, é válido ressaltar que o clima apresenta variabilidade temporal e espacial decorrentes de processos na atmosfera, na cobertura terrestre, e nos oceanos, devido à radiação solar (ANA, 2016). Angelocci e Sentelhas (2007, p.1, grifo dos autores) definem a “*variabilidade climática* como uma variação das condições climáticas em torno da média climatológica. Já *anomalia climática* refere-se a uma flutuação extrema de um elemento em uma série climatológica, com desvios acentuados do padrão observado de variabilidade. E *mudança climática* é um termo que designa uma tendência de alteração da média no tempo”.

Segundo a Agência Nacional de Águas (2016, p. 11) a variabilidade climática pode ser mais bem compreendida em três esferas: a sazonal, interanual e interdecadal.

“A variabilidade climática mais conhecida é a variabilidade sazonal, que representa a variação dentro do ano em função da rotação da Terra ao redor do Sol. Há também a variabilidade interanual e a interdecadal. A primeira caracteriza a frequente variação das condições climáticas entre anos, já a variação interdecadal, que pode englobar períodos como um século, é aquela responsável por alterar as condições de sustentabilidade de uma sociedade devido a períodos climáticos longos acima ou abaixo da média, causando impactos sobre as condições de vida no globo”

Tucci (2002, p.8) define a *variabilidade climática* como “as variações de clima em função dos condicionantes naturais do globo terrestre e suas interações”. O autor considera a “*modificação climática* como as alterações da variabilidade climática devido as *atividades humanas*”. Isto é, para o autor, as mudanças (ou modificações) climáticas estão intrinsicamente condicionadas ao efeito das ações humanas.

Como já mencionado, as mudanças climáticas possuem acentuados efeitos para o setor de recursos hídricos, pois estas podem modificar os padrões da precipitação, vazão e evapotranspiração, alterando a variabilidade natural destes sistemas (Tucci, 2002). Quando a variabilidade natural dos sistemas é alterada, pode

ocorrer a maior probabilidade e severidades de extremos climáticos, como secas e cheias.

Segundo D'oria et al (2018) a análise da variabilidade climática é comumente realizada em estudos que utilizam dados de séries temporais de precipitação e temperatura, sendo esta a abordagem mais reconhecida para realizar projeções futuras climáticas. Aliada a tal abordagem, a utilização de modelos climáticos baseados processos físicos vêm sendo amplamente utilizados para realização de projeções futuras. Tais modelos baseiam-se na resposta de diferentes cenários de emissão de GEE.

#### 4.2.1 Modelos Gerais de Circulação

Modelos Gerais de Circulação (também traduzido em pesquisas brasileiras como Modelos Globais Climáticos - GCMs), são resultantes de uma estrutura colaborativa projetada para aprimorar o conhecimento das mudanças climáticas, denominada *Coupled Model Intercomparison Project*, que atualmente encontra-se em sua 6ª fase (CMIP6). Os atuais modelos do CMIP5 são úteis para entender a evolução futura do clima global. O IPCC (2015, trad.) utiliza a seguinte definição para os GCMs:

“GCMs são modelos numéricos que representam processos físicos na atmosfera, oceano, criosfera e superfície terrestre, sendo as ferramentas mais avançadas atualmente disponíveis para simular a resposta do sistema climático global ao aumento das concentrações de GEE. Embora modelos mais simples também tenham sido usados para fornecer estimativas globais ou regionais da resposta climática, apenas os GCMs, possivelmente em conjunto com os modelos regionais aninhados, têm o potencial de fornecer estimativas geograficamente e fisicamente consistentes das mudanças climáticas regionais necessárias em análises de impacto.”

Entretanto, devido algumas considerações no que tange a resolução espacial destes modelos (entre 100 a 300 km), alguns autores consideram que a resolução pode ser grosseira para avaliar mudanças regionais ou locais (D'Oria et al, 2018), e que estes modelos podem carregar incertezas devido às suas condições iniciais e às suas próprias estruturas (ANA, 2016). A própria definição utilizada pelo IPCC (2015, trad.) ressalta essa limitação carregada pelos GCMs.

“GCMs representam o clima usando uma grade tridimensional ao redor do globo com uma resolução horizontal entre 250 e 600 km, 10 a 20 camadas verticais na atmosfera e às vezes até 30 camadas nos oceanos. Sua resolução é, portanto, bastante grossa em relação à escala das unidades de exposição na maioria das avaliações de impacto. Além disso, muitos

processos físicos, como os relacionados às nuvens, também ocorrem em escalas menores e não podem ser modelados adequadamente. “

Em geral, emprega-se uma grande quantidade de GCMs para aumentar a confiabilidade dos resultados e obter uma melhor estimativa das incertezas associadas aos padrões climáticos simulados e projetados. Tebaldi e Knutti (2007), a partir de um trabalho que realizou uma revisão bibliográfica de estudos de modelos climáticos, ressaltaram que quanto maior a quantidade de modelos GCMs e cenários utilizados, melhor a parametrização dos resultados. Entretanto tal prática pode gerar dificuldades na interpretação destes resultados.

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2016), o ideal para fins de transformação das variáveis climatológicas em variáveis hidrológicas, é realizar uma modelagem na escala de bacia ou de região hidrográfica. Desse modo, um único modelo certamente não seria capaz de atender as características das séries históricas e nem predizer as simulações de situações futuras. Por esta razão, em geral são aplicadas uma grande quantidade de modelos em trabalhos de projeções climáticas.

#### 4.2.2 Cenários de Mudanças Climáticas

Devido à tendência do crescimento econômico, é esperado que as emissões de GEE cresçam até o final do século. O IPCC, a partir das contribuições dos membros do Grupo de Trabalho I (WGI) realizou a classificação de diferentes cenários para prever as futuras condições do clima (Tabela 1). Os GCMs oriundos do CMIP5 são simulados nestes diferentes cenários projetados (cenários do *Special Report on Emission Scenarios* – SRES, do WGI), levando em consideração o histórico evolutivo de diversos fatores, como emissão de gases, concentração de GEE, e informações de tipo de cobertura terrestre.

Esses cenários são denominados (desde o AR5, 2014) de RCPs (“Caminhos Representativos de Concentração”). A abordagem atual emprega o conceito das forçantes radiativas, e segundo ANA (2016), desse modo “gera caminhos integrados úteis para a avaliação de estratégias de mitigação, de opções de adaptação e de impactos residuais”.

**Tabela 1** - Caminhos Representativos de Concentração (RCPs)

<b>Cenário</b>	<b>Descrição</b>
<b>RCP 8,5</b>	Caminho crescente da força radioativa atingindo 8,5 W/m <sup>2</sup> em 2100
<b>RCP 6,0</b>	Estabilização em 6 W/m <sup>2</sup> após 2100
<b>RCP 4,5</b>	Estabilização em 4,5 W/m <sup>2</sup> após 2100
<b>RCP 2,6</b>	Pico na forçante radiativa em ~ 3 W / m <sup>2</sup> antes de 2100 e declínio

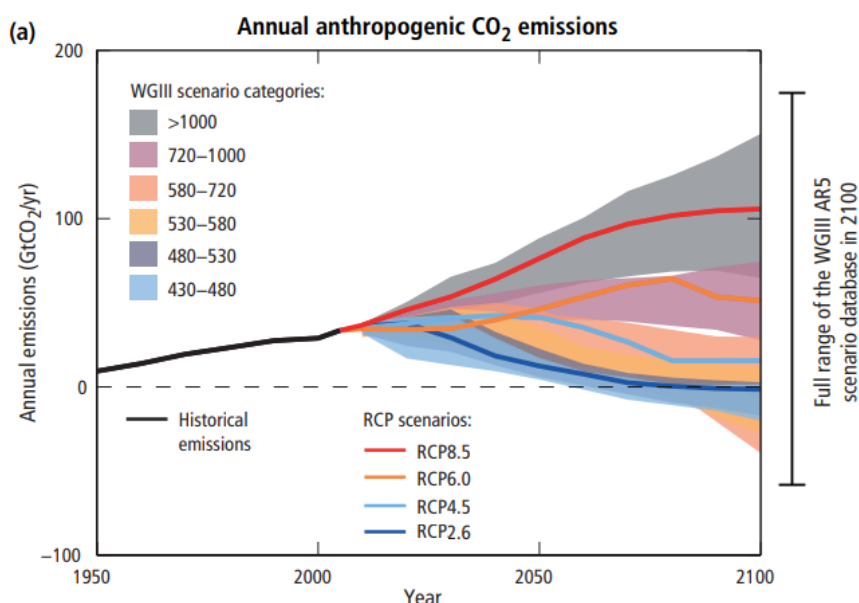
Fonte: Moss (2008) Adaptado de Agência Nacional de Águas, 2016

A abordagem atual apresentada na Tabela 1 classifica os cenários em uma escala que alterna entre o que é considerado um *cenário otimista* (RCP 2.6), dois *cenários intermediários* (4.5 e 6.0) e um *cenário pessimista* (RCP 8.5). No cenário mais otimista (2.6), o crescimento das emissões atinge o pico no meio do século e depois recua.

Nos cenários intermediários (4.5 e 6.0), as emissões estabilizam-se, porém no RCP 4.5 o aumento de radiação se estabiliza antes de 2100, enquanto no segundo cenário essa estabilidade ocorre apenas em 2100. No cenário pessimista (8.5) o acréscimo na quantidade de GEE é na ordem de 4 vezes superior aos demais cenários. Tal cenário é caracterizado pelo aumento constante na taxa de radiação provocada pelo crescimento na emissão de GEE em maior concentração.

No AR5 (IPCC, 2014) é detalhado que as emissões e forçantes radioativas são compostas principalmente pela contribuição das emissões de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), metano ( $CH_4$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ) e dióxido de enxofre ( $SO_2$ ). As categorias dos cenários do IPCC, entretanto resumem a ampla gama de cenários de emissão publicados na literatura científica e são definidos com base nas concentrações totais equivalentes de  $CO_2$  (em ppm).

A Figura 1 ilustra o comportamento de cada cenário RCP comparando-os com as emissões históricas anuais. Segundo o AR5 do IPCC (2014), se nenhum esforço adicional for empregado para restringir as emissões, os caminhos levam a cenários que poderão variar entre o RCP 6.0 e o RCP 8.5 (intermediário a pessimista), enquanto o RCP 2.6 representaria um possível cenário visando manter o aquecimento global abaixo de 2°C.



**Figura 1** - Emissões de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) para os diferentes caminhos de concentração representativos (RCPs), em comparação com as emissões históricas.

Fonte: IPCC AR5 (p.9).

### 4.3 Crise Hídrica no DF e impactos na Bacia do Rio Descoberto

A barragem do Descoberto, construída em 1971, tinha inicialmente o objetivo de abastecer a cidade satélite de Ceilândia e incrementar o abastecimento de Taguatinga e Guará. Durante o mês de novembro de 2017, o reservatório do Rio Descoberto atingiu a marca recorde de 5% do seu volume útil, mesmo após o racionamento de 30% das vazões derivadas. Desde sua construção até os dias de hoje, novas cidades foram incorporadas ao sistema de abastecimento e atualmente, o reservatório do Descoberto é responsável por abastecer 60% da população do DF.

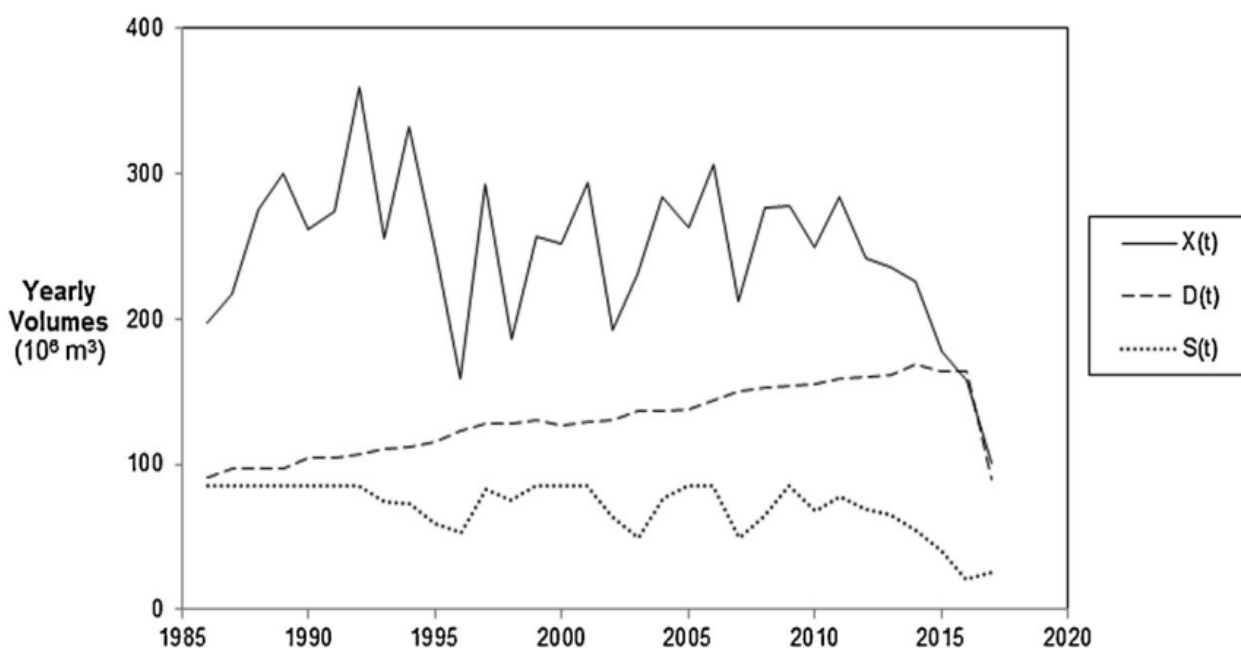
Entre 2015 a 2017 o reservatório do Descoberto atingiu os níveis mais baixos de armazenamento desde sua entrada em operação, em consequência de uma grave crise hídrica. Diversos esforços foram empregados por gestores e usuários de água para enfrentamento de crise durante o período, com o objetivo de evitar um possível colapso do Sistema do Descoberto. Segundo Diniz (2019), os fatores que desencadearam a crise hídrica no Distrito Federal foram: redução da pluviosidade na área de contribuição do reservatório do Descoberto, aumento da demanda por água nas áreas atendidas pelo sistema e aumento das retiradas por usos produtivos na bacia à montante.



Nos anos de estiagem (2015 a 2017), a precipitação média anual na região da bacia do Rio Descoberto apresentou valores muito abaixo da média histórica anual (1500 mm). Diniz (2019) ressalta que, somado à baixa precipitação, a crescente demanda por água na região foi um dos principais fatores que desencadearam a crise.

Em um relatório oficial do Governo do Distrito Federal (CODEPLAN, 2018), são apontadas como causas específicas da crise hídrica do Distrito Federal algumas questões locais como: (a) destruição de nascentes, (b) impermeabilização do solo, (c) sedimentação de canais e (d) consumo elevado. Em geral, esses fatores estão associados com a mudança do uso e cobertura do solo.

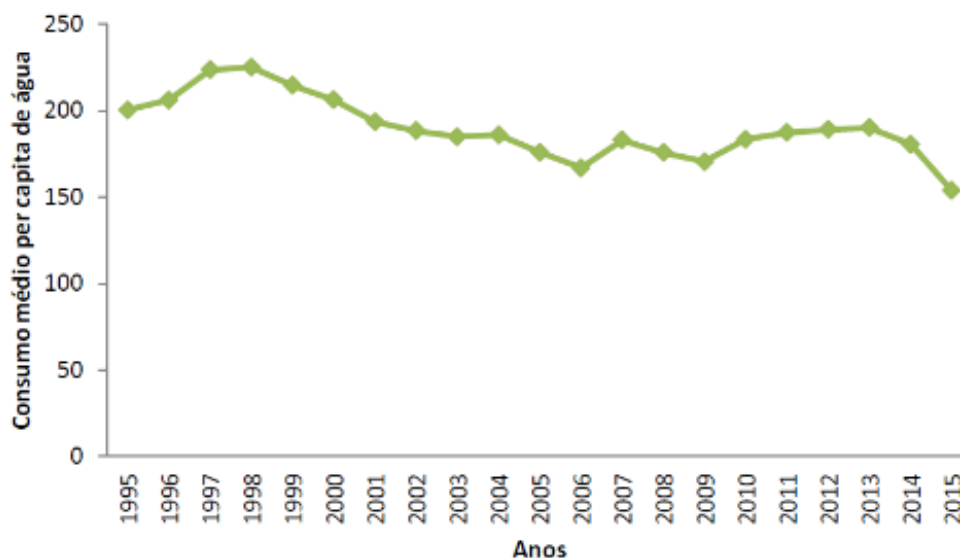
Chaves e Lorena (2019) conduziram um estudo realizando uma análise dos parâmetros hidrológicos no contexto da falha do reservatório do Descoberto durante o ano de 2017. Os autores apontam que a principal causa da falha foi a persistência de baixas entradas de água, causando esgotamento do reservatório. Além disso, a crescente taxa de captação foi um fator agravante. A Figura 2 abaixo mostra que ocorreu uma diminuição na entrada de água nos últimos 6 anos da série histórica, e um aumento sistemático na demanda desde 1986. Além disso, durante o regime de racionamento a demanda por água foi reduzida a 30%.



**Figura 2** - Entradas anuais ( $X(t)$ ), demandas ( $D(t)$ ) e armazenamentos ( $S(t)$ ) do reservatório do Descoberto (1986-2017).

Fonte: Chaves e Lorena (2019)

O consumo de água no DF vem caindo desde 2014, antes do racionamento de 2017, conforme é apresentado na Figura 3, com base nos índices estimados pela Caesb (Disponíveis no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS). A redução do consumo média per capita chama atenção devido ao fato de ser um índice inversamente proporcional ao crescimento populacional.



**Figura 3** - Variação do consumo médio per capita de água (L/hab./dia) para o Distrito Federal entre 1995 e 2015.

Fonte: Teixeira (2018)

O relatório da CODEPLAN (2018) aponta que dentre os fatores relacionados com a queda do consumo, o destaque na mídia gerado pela crise hídrica de 2014 em São Paulo possui caráter expressivo. É levantada a hipótese de que a redução ocorreu devido à crise econômica que ocorreu durante esta época, mas não é descartada a hipótese de que o aumento de captação irregular de água possa ter impulsionado a redução de consumo, pois tais fontes de extrações não são registradas nos relatórios da Caesb, mas contribuem com a diminuição do nível dos reservatórios. No relatório não é mencionado o fator das mudanças climáticas na crise hídrica no Distrito Federal, voltando-se mais para fatores populacionais, sociais e de uso do solo.

Apesar do consumo de água ter reduzido, segundo Teixeira (2018), a perda de água no processo de distribuição pode chegar em até 35% na Bacia do Descoberto. As perdas por abastecimento podem ter diversas origens, uma delas já destacada

pelo relatório da CODEPLAN concerne ao uso clandestino de captações irregulares. Entretanto, Diniz (2019), aponta outro dois fatores que podem ser responsáveis pela perda de água durante este processo, os quais destacam-se: (a) vazamentos no sistema, como adutoras, redes de distribuição, etc e (b) erros de medição, por exemplo.

Devido a estes eventos que ocorreram num passado próximo, torna-se de extrema importância compreender o panorama geral acerca dos fatores que desencadearam a crise hídrica no Distrito Federal, visando buscar soluções mitigadoras para evitar a ocorrência de eventos extremos da mesma dimensão em um futuro próximo.

#### **4.4 Adaptação às mudanças climáticas**

##### **4.4.1 Vulnerabilidade e incertezas**

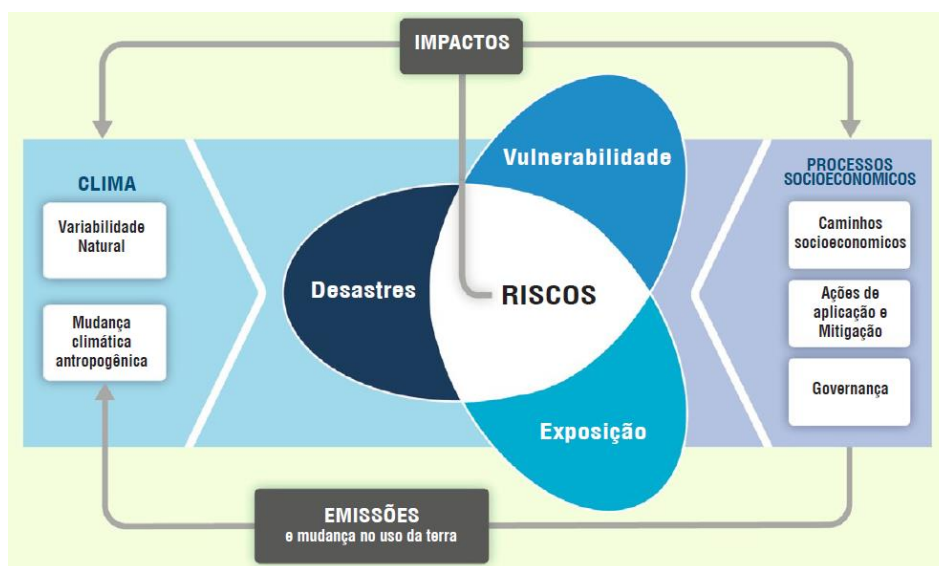
Os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos geram discussões acerca dos desafios impostos perante as incertezas atreladas aos métodos de adaptação. A elaboração de cenários em função do nível de emissão de GEE é uma destas fontes de incertezas, principalmente no que tange a variabilidade natural dos sistemas. Simonovic (2009) ressalta que a incerteza na gestão de recursos hídricos é decorrente de dois principais fatores: (a) incertezas inerentes a variabilidade hidrológica e (b) incertezas causadas pela falta de conhecimentos dos dados (i.e., incertezas ligadas a ausência de projeções seguras sobre o comportamento dos recursos hídricos).

O Grupo de trabalho II (WGII) do IPCC possui uma abordagem acerca da vulnerabilidade dos sistemas naturais e socioeconômicos perante as mudanças climáticas. Este grupo também considera a relação entre a vulnerabilidade, adaptação e desenvolvimento sustentável. Para estas avaliações são considerados setores (recursos hídricos, ecossistemas, produção de alimentos e florestas, sistemas costeiros, indústria e saúde humana) e regiões de todo o globo.

A *vulnerabilidade* é definida pelo IPCC (AR5, 2014 p. 54) como “propensão ou pré-disposição a ser adversamente afetado. Vulnerabilidade engloba uma variedade de conceitos e elementos, incluindo sensibilidade ou susceptibilidade a danos e falta de capacidade para lidar e se adaptar”. Desse modo, é compreendido que as pessoas

em situação de vulnerabilidade em todo o mundo estão mais propensas a sofrerem os impactos causados pelas alterações climáticas. Outro conceito utilizado pelo IPCC é o de *exposição*, que é definido como “presença de pessoas, meios de subsistência, espécies ou ecossistemas, funções ecossistêmicas, serviços e recursos, infraestrutura ou recursos econômicos, sociais ou culturais em locais e configurações que podem ser afetadas adversamente”.

A interação entre a vulnerabilidade, exposição e desastre climáticos são os principais riscos dos impactos relacionados ao clima. (Figura 4). Mudanças nos processos climáticos e nos processos socioeconômicos impulsionam desastres, exposição e vulnerabilidade. Desse modo, gerenciar os riscos que envolvem alterações climáticas envolve a tomada de decisões de adaptação e mitigação, visando aumentar a resiliência dos ecossistemas.



**Figura 4** - Conceitos-chaves abordados no AR5 (IPCC). Associação entre desastres, vulnerabilidade e exposição como intensificadores do risco aos impactos gerados pela mudança do clima. Fonte: Versão traduzida do AR5 (2014)

Experiências no âmbito de adaptação são crescentes em várias regiões do mundo, tanto por ações dos setores públicos e privados quanto a nível de comunidades. Governos estão iniciando o desenvolvimento de planos e políticas de adaptação e de integração das considerações sobre as mudanças climáticas em amplos projetos de desenvolvimento. O WGII realizou um levantamento sobre estas experiências ao redor do mundo, as quais são apresentadas na Tabela 2, abaixo:

**Tabela 2** - Ações recentes de adaptação no setor público e privado

<b>Região</b>	<b>Exemplos em ações de adaptação</b>
<b>América Latina</b>	Está ocorrendo esforços para implementar a Adaptação baseada em Ecossistemas (AbE) – incluído áreas protegidas, contratos de conservação e gestão comunitária de áreas naturais. Variedades resistentes de culturas, previsões climáticas e gestão integrada dos recursos hídricos estão sendo adotadas no setor agrícola em algumas áreas.
<b>África</b>	Governos nacionais estão iniciando sistemas de governança para a adaptação. Para reduzir a vulnerabilidade (ainda que os esforços se mostrem isolados), algumas ações iniciaram-se, como: Gestão de risco de desastres, ajustes nas tecnologias e infraestrutura, AbE, medidas básicas de saúde pública e diversificação das formas de sustento da população.
<b>Ásia</b>	A adaptação foi aplicada em algumas áreas através da integração de medidas de adaptação climática ao planejamento do desenvolvimento subnacional, como sistemas de alerta precoce, gestão integrada dos recursos hídricos, implantação de sistemas agroflorestais e reflorestamento de manguezais.
<b>Europa</b>	A política de adaptação desenvolve-se em todos os níveis do governo com planejamento de adaptação integrada na gestão costeira e da água, na proteção ambiental e ordenamento do território, bem como na gestão do risco de desastres.
<b>América do Norte</b>	Avaliação e planejamento da adaptação no nível municipal. Algumas atividades proativas de adaptação ocorrem, para proteção dos investimentos em longo prazo de energia e infraestrutura pública.

Fonte: AR5 (2014, tópico 4. pg. 106). Adaptado e traduzido pela autora.

No decreto Nº 9.578, de 22 de novembro de 2018, foi regulamentada a Política Nacional de Mudança do Clima brasileira, instituindo a integração entre o Plano Nacional sobre Mudança do Clima e os planos de ação para a prevenção e o controle do desmatamento nos biomas e mitigação e de adaptação às mudanças climáticas.

O decreto institui os principais planos voltados para baixas emissões de GEE voltados para os biomas brasileiros com maior incidência de incêndios e os setores da economia com maiores taxas de emissão. O objetivo desses planos é voltar ações mitigadoras para os setores usuários contribuintes para a alteração do clima, com destaque para: (a) Plano de Ação para a Prevenção e Controle do Desmatamento e das Queimadas no Cerrado – PPCerrado; (b) Plano para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura – Plano ABC e (c) Plano de Redução de Emissões da Siderurgia.

No âmbito de estratégias adaptativas, pode-se destacar a contribuição obtida pela instituição do Plano Nacional de Adaptação a Mudança do Clima (PNA), em 2016.

O PNA tem como objetivo reduzir a vulnerabilidade nacional à mudança do clima e realizar uma gestão de risco associada a esse fenômeno. Tal instrumento foi elaborado pelo governo federal em colaboração com a sociedade civil, setor privado e governos estaduais. Na elaboração do PNA foram considerados 11 setores de interesse, dentre os quais (a) agricultura, (b) recursos hídricos (c) segurança alimentar e nutricional (d) biodiversidade, entre outros.

No capítulo do PNA sobre as estratégias a serem implementadas para o setor de recursos hídricos, são identificadas as medidas de adaptação para melhorar a resposta da gestão dos recursos hídricos e a governança em um cenário de variabilidade climática. As ações nesse documento abordam estratégias e diretrizes para governanças direcionada aos setores de abastecimento urbano, irrigação, setor energético e industrial.

#### 4.4.2 Adaptação baseada em ecossistemas

As populações em situação de vulnerabilidade que vivem nos países em desenvolvimento dependem dos recursos naturais para sobreviver, sendo a principal fonte de subsistência destas. Neste sentido, o impacto das mudanças climáticas sobre os ecossistemas e serviços ambientais afetam diretamente a vida destas pessoas. A definição de AbE encontrada na literatura envolve a interrelação entre pessoas e serviços ecossistêmicos, tendo como premissa básica a crença que ecossistemas funcionais são capazes de auxiliar pessoas na mitigação e adaptação perante a mudança do clima.

A ideia de AbE surgiu, originalmente, no âmbito das organizações não governamentais e intergovernamentais como uma solução natural em resposta aos efeitos das mudanças climáticas. A introdução do conceito ocorreu em 2008, na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) na COP 14, estimulada pela atuação de organizações não governamentais como a *International Union for Conservation of Nature (IUCN)*, *The Nature Conservancy (TNC)* e outras. (GIZ, 2015).

O Ministério do Meio Ambiente define AbE como uma ferramenta que utiliza a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos como principal estratégia para ajudar as pessoas a se adaptarem aos impactos da mudança do clima. As principais estratégias e diretrizes da AbE foram aplicadas pelo governo federal na região da Mata Atlântica,

as quais foram aplicados modelos climáticos regionais disponíveis para o Brasil (Eta HadGEM2-ES e Eta MIROC5), para dois cenários de emissão de GEE (RCP 4.5 e RCP 8.5).

Em um levantamento realizado pela Fundação Grupo Boticário (2015) foram identificadas 12 projetos de AbE pelo Brasil, com ações voltadas para os biomas Mata Atlântica, Amazônia, Cerrado, Caatinga e Pantanal, direcionadas aos ecossistemas costeiros, urbanos e mangues. Dentre os principais objetivos destes projetos, destacam-se a criação de novas áreas protegidas, conservação da biodiversidade, reflorestamento e ações voltadas para a recuperação de nascentes e proteção dos recursos hídricos.

Dentre os principais casos de sucesso de implementação da AbE no bioma Cerrado, destacam-se algumas ações inspiradoras que poderiam facilmente direcionar posteriores ações e estratégias adaptativas para a Bacia do Rio Descoberto. O primeiro caso é o Projeto Aclimar, que foi implementado na microbacia do Urubu, no Distrito Federal. O objetivo do projeto é o desenvolvimento de tecnologias que auxiliem as comunidades e os ecossistemas da bacia do Urubu a se adaptarem aos efeitos das mudanças climáticas. As principais ações desenvolvidas pelo projeto são voltadas para a conservação de nascentes, manutenção de corredores ecológicos e a implementação de medidas de adaptação para as comunidades. O projeto é fruto da cooperação entre sociedade civil, a organização não-governamental *World Wide Fund for Nature* (WWF) e a Universidade Católica de Brasília.

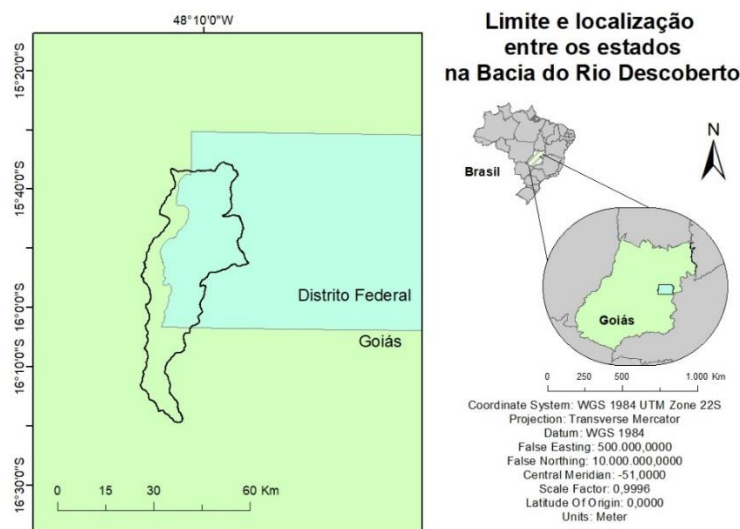
O segundo caso de sucesso é o Projeto Cerrado Sustentável, implementado na bacia hidrográfica do Alto Paraguai, no estado do Mato Grosso. Tal projeto possui o objetivo de propiciar mecanismos de conservação da biodiversidades compatíveis com o desenvolvimento agropecuário existente na bacia, e as principais ações desenvolvidas são a recuperação de áreas de preservação permanente (APP), regularização de reservas legais e elaboração de manual técnico para restauração de florestas ciliares e reservas legais. O Projeto é fruto de uma parceria entre a Federação da Agricultura Pecuária do Mato Grosso, a organização não governamental TNC e a Secretaria de Meio Ambiente do Mato Grosso.

## 5. METODOLOGIA

### 5.1 Caracterização da área de estudo

#### 5.1.1 Localização e delimitação da bacia

A bacia do Rio Descoberto faz parte da Região Hidrográfica do Paraná, estando localizada na porção oeste do Distrito Federal, entre as latitudes  $15^{\circ}30'0''\text{S}$  e  $16^{\circ}20'00''\text{S}$  e as longitudes  $48^{\circ}30'0''\text{W}$  e  $48^{\circ}0'0''\text{W}$ , na divisão entre os estados de Goiás e Distrito Federal. (Figura 5). A delimitação da bacia foi obtida no portal de bacias hidrográficas ottocodificadas (níveis Otto), disponibilizado pelo site da Agência Nacional de Águas (ANA). Foi utilizado a categoria “Área de Contribuição Hidrográfica (Nível 6B)”. As projeções que originalmente encontravam-se em SAD 69 foram convertidas para WGS 1984 Zona 22 Sul, para produção do recorte com os limites da bacia.



**Figura 5** - Localização da bacia do Rio Descoberto. Fonte: Elaboração pela autora.

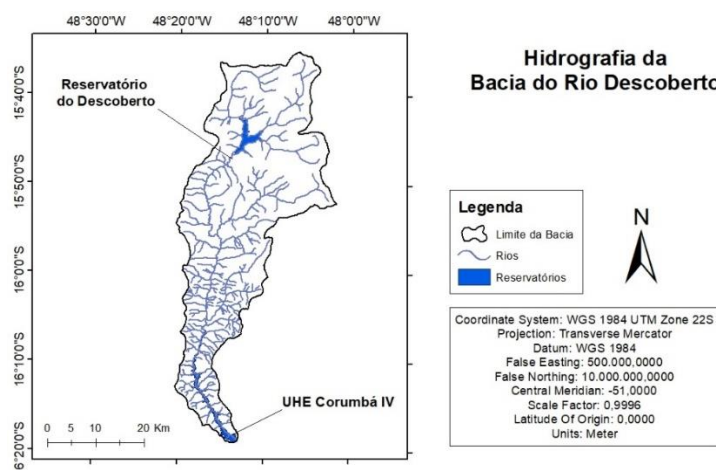
#### 5.1.2 Rede de drenagem

O reservatório do descoberto abastece atualmente 60% da população do Distrito Federal. Nasce a 1.300 m de altitude na região noroeste do Distrito Federal, desenvolvendo-se inicialmente nos contrafortes da Chapada da Veredinha no Planalto Central e segue na direção noroeste, após a afluência de seus formadores: os córregos Capão da Onça e Bucanhão. (Do Carmo, 2005)



Ao sul da bacia do Descoberto está o reservatório do Rio Corumbá. Tal reservatório possui uma extensão de 173 km<sup>2</sup> e ocupa as áreas dos municípios de Luziânia, Alexânia, Abadiânia, Corumbá de Goiás, Silvânia, Santo Antônio do Descoberto e Novo Gama. O reservatório de Corumbá IV possui mais de 9.000 hectares de Área de Preservação Permanente (APP) e tem 783,7 km de perímetro. (Figura 6).

O mapa da hidrografia da Bacia do Rio Descoberto foi gerado a partir dos dados disponibilizados no portal Sistema Estadual de Geoinformação do Estado de Goiás (SIEG), produzido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na escala de 1:100.000, de Datum SIRGAS 2000/ UTM zona 22 Sul, que posteriormente foi convertido para WGS 1984.



**Figura 6** - Hidrografia da Bacia do Rio Descoberto. Fonte: Elaboração pela autora

### 5.1.3 Solos

As classes de solo presentes na bacia do Rio Descoberto são: (a) Cambissolos (háplicos distróficos); (b) Latossolos (vermelho e vermelho-amarelo distróficos) e ao norte apresenta uma pequena fração de (c) neossolo litólico distrófico. A classe de solos mais abundante na bacia é a de Cambissolos, que ocupam cerca de 38,74% da área total da bacia, seguida de latossolo vermelho-amarelo distrófico (32,34%) e latossolo vermelho distrófico (13,58%), apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3** - Área e proporção das diferentes classes de solo presentes na bacia do Rio Descoberto

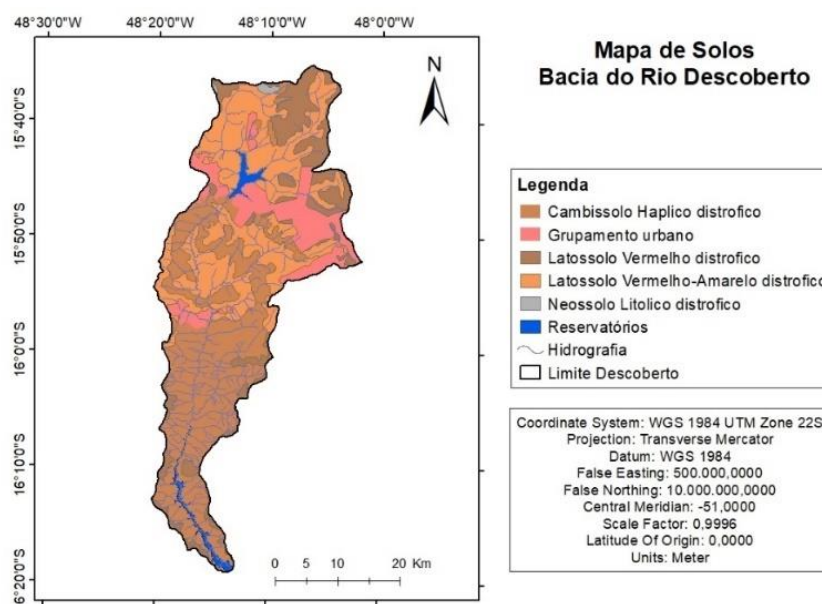
Classe de Solo	Área (Km) <sup>2</sup>	%
Cambissolo Haplico distrofico	499.015	38,79
Latossolo Vermelho-Amarelo distrofico	416.276	32,34

*Tabela 3 (continuação)*

Latossolo Vermelho distrofico	174.876	13,58
Grupamento urbano	162.487	12,62
Reservatórios	28.795	2,24
Neossolo Litolico distrofico	5.203	0,40

Os cambissolos são considerados solos rasos, bem drenados e que apresentam de alta a média erodibilidade, enquanto os latossolos são solos profundos, bem drenados e com baixa erodibilidade. (Spera et. al 2004). Santos (2016), utilizando o fator erodibilidade dos solos como critério para definição de áreas prioritárias para conservação na bacia do Descoberto, sugere que nas áreas onde há abundância de cambissolos é necessário uma alta prioridade de conservação. Os resultados sugeridos pela autora foram realizados a partir de uma análise multicritérios, utilizando os limites dos solos presentes na bacia quanto ao potencial de sofrerem erosão hídrica. Com relação aos latossolos, apesar de possuírem baixa erodibilidade natural, segundo Spera (2004), se submetidos a condições de manejo inadequado podem conduzir a formação de erosão por sulcos e voçorocas.

O mapa de solos da bacia do Rio Descoberto foi gerado a partir do mapeamento de solos do estado de Goiás (Escala 1:250.000), disponibilizado pelo Sistema Estadual de Geoinformação (SIEG), de Datum SIRGAS 2000/ UTM zona 22 Sul, que posteriormente foi convertido para WGS 1984 (Figura 7).



**Figura 7** - Classes de Solo na Bacia do Rio Descoberto. Fonte: Elaboração pela autora

#### 5.1.4 Uso e cobertura do solo

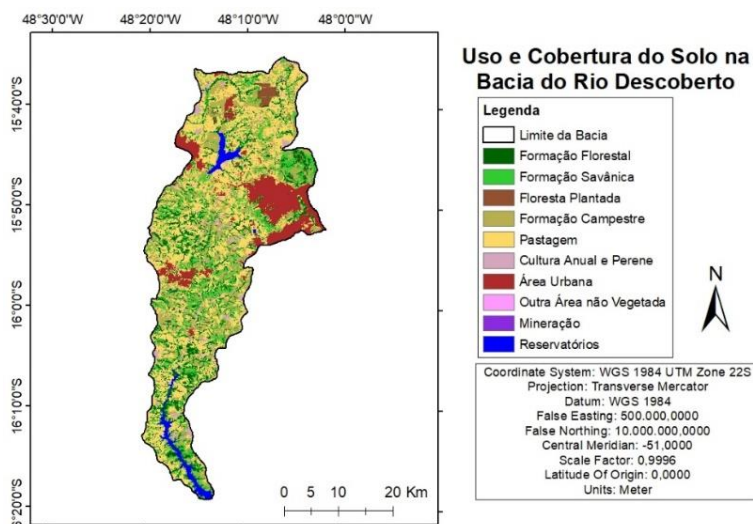
O mapeamento do uso e cobertura do solo na bacia do Rio Descoberto para o ano de 2018 foi realizado a partir dos dados disponibilizados pelo portal MapBiomias. Os dados do MapBiomias são gerados a partir da classificação pixel a pixel de imagens das satélites Landsat, cujo processamento é realizado com extensivos algoritmos de aprendizagem de máquina (machine learning) através da plataforma Google Earth Engine. Desse modo, foi feito um recorte para a bacia do Rio Descoberto e foram calculadas as áreas das classes de uso do solo para a região de interesse, que é apresentado na Figura 8.

A maioria da área da bacia é coberta por pastagens (34,83%), seguida pelas seguintes fitofisionomias do bioma Cerrado: formações campestres (19,59%), formações savânicas (16,20%) e formações florestais (12,31%). A infraestrutura urbana ocupa (10,35%) do território, seguida de outras classificações de menor abundância, todas apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4 - Área e proporção das diferentes classes de uso do solo presentes na Bacia do Rio Descoberto**

Classe de Uso do Solo	Área (Km) <sup>2</sup>	%
Pastagem	448.198	34,83
Formação Campestre (Campo)	252.053	19,59
Formação Savânica	208.448	16,20
Formação Florestal	158.394	12,31
Infraestrutura Urbana	133.122	10,35
Reservatórios	33.090	2,57
Outra Área não vegetada	19.914	1,55
Cultura Anual e Perene	18.356	1,43
Floresta Plantada	15.126	1,18
Mineração	0.062	0,005

Teixeira (2018), em um estudo conduzido na Área de Proteção Ambiental (APA) da bacia do Rio Descoberto visando avaliar a evolução do uso do solo e a fragmentação da vegetação na região entre 2011 e 2014, encontrou resultados indicando que a bacia pode ser considerada uma região consolidada no uso e ocupação das terras, com poucas alterações observadas na paisagem natural neste período. O período avaliado pelo autor, entretanto, não abrange todo o período *baseline* avaliado no presente estudo.

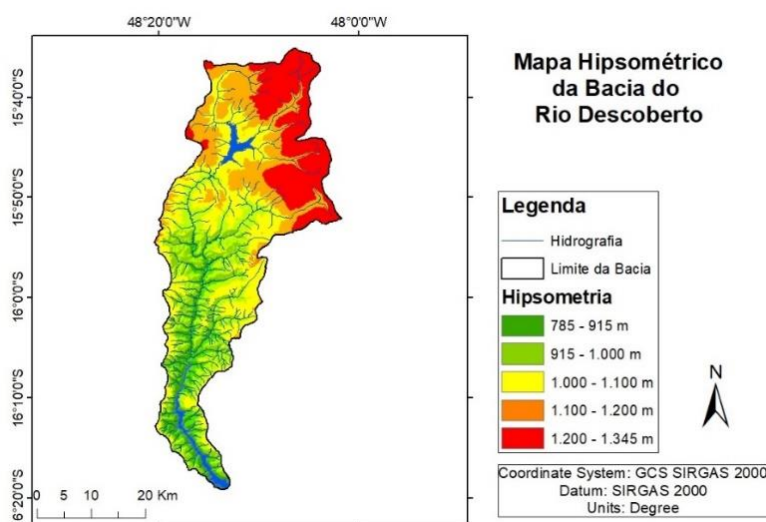


**Figura 8** - Uso e cobertura do solo na Bacia do Rio Descoberto. Fonte: Elaboração pela autora

### 5.1.5 Relevo

Com relação ao relevo na bacia, ocorre a predominância de formas retilíneas planares a divergente retilínea. Tais feições promovem uma dispersão dos fluxos superficiais e a formação de extensas rampas onde podem estar associados solos coluviais. As formas convergentes são encontradas abundantemente na parte norte da bacia, nas proximidades dos afluentes do reservatório do Descoberto. Nesta região ocorre a concentração dos relevos mais altos da bacia (Figura 9).

O mapa hipsométrico foi realizado a partir dos dados disponibilizados pelo Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul, disponibilizados pelo Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil pelo projeto TOPODATA (Valeriano, 2004).



**Figura 9** - Hipsometria na Bacia do Rio Descoberto. Fonte: Elaboração pela autora

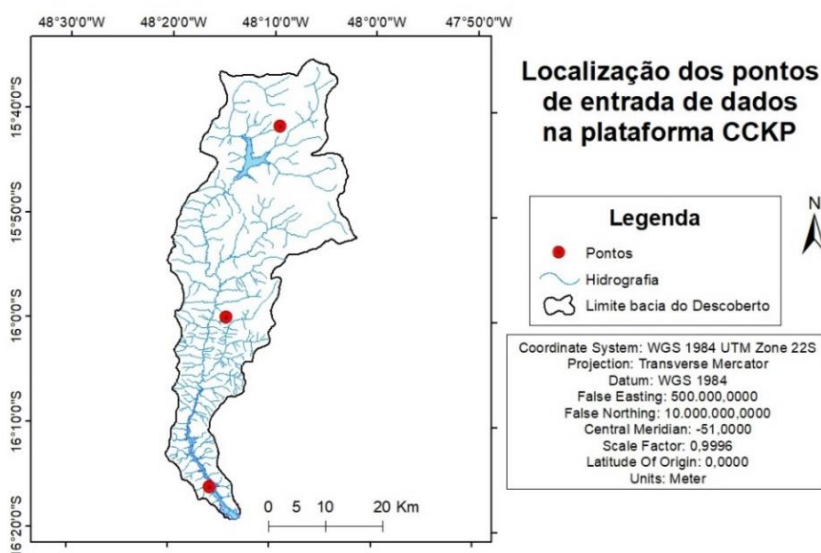
## 5.2 Obtenção e análise de dados

### 5.2.1 Análise de séries históricas

Os dados históricos de P e T foram obtidos na plataforma *Climate Change Knowledge Portal for Development Practicioners and Policy Makers* (CCKP, World Bank Group). A fonte de dados utilizada na plataforma é a Climate Research Unit (CRU) TSv. 4.01 (Harris *et al.*, 2014), que utiliza um conjunto de dados observacionais disponíveis globalmente. O conjunto de dados CRU é uma referência amplamente aceita em pesquisas climáticas, fornecendo dados de temperatura e precipitação com controle de qualidade. Além disso, os dados da série histórica são derivados de três fontes, todas de qualidade controlada pelas principais instituições do setor de pesquisas climáticas.

Para a análise de séries históricas, os dados de entrada disponíveis no portal CCKP são, respectivamente: (a) as coordenadas do ponto de interesse (o usuário insere a latitude e longitude em graus decimais); (b) variável a ser analisada (são disponibilizadas temperatura ou precipitação) e (c) período a ser analisado (a plataforma disponibiliza dados históricos desde 1901 até 2016).

Foram escolhidos três pares de coordenadas da Bacia do Descoberto, buscando uma maior distribuição geográfica, tentando atender diferenças entre características físicas na bacia. A distribuição destes pontos é apresentada na figura 10.



**Figura 10** - Localização das coordenadas de entrada para obtenção dos dados climáticos no CCKP.  
 Fonte: Elaboração pela autora

O período escolhido para análise das séries históricas foi de 1991 a 2016. A plataforma retorna como saída dados tabulares contendo as médias de temperatura e precipitação mensais para o período solicitado (de cada ano). Esses dados foram utilizados como o *baseline* do presente estudo, assim como é utilizado nos gráficos gerados pelo CCKP.

Desse modo, foram obtidos como dados de saída 8 planilhas para as coordenadas da Bacia do Descoberto. Cada planilha continha a série histórica com médias de precipitação e temperatura mensal para análise. Posteriormente, estes dados foram utilizados na etapa de modelagem hidrológica, que será detalhada nas etapas seguintes.

### 5.2.2 Modelos de projeção climática

Segundo os metadados do CCKP, as projeções das variáveis temperatura e precipitação média foram produzidas com o objetivo de fornecer a comparação mais robusta possível entre os possíveis RCPs. Essas informações foram disponibilizadas pela compilação de 16 modelos que possuíam informações disponíveis para os diferentes RCPs.

De tal modo, a plataforma fornece dados tabulares contendo as médias de temperatura e precipitação mensais para o período solicitado, fornecendo dados médios do conjunto de anos (*i.e*, não fornece projeções anuais). O período escolhido para análise das projeções climáticas foi o conjunto 2020 a 2039, com obtenção de estatísticas médias das variáveis temperatura e precipitação em 4 cenários RCP.

Para a análise dos modelos de projeção climática, os dados de entrada disponíveis no portal CCKP são: (a) tipo (conjunto de modelos CMIP5); (b) variáveis (variáveis climáticas essenciais) ;(c) as coordenadas da região de interesse (vide figura 10); (d) período a ser analisado (a plataforma disponibiliza dados de projeção de 2020 a 2099, agrupados de 20 em 20 anos); (d) estatísticas (médias ou anomalias de precipitação); e por fim (e) cenário de emissão a ser avaliado (baixas, médias, média-alta e altas emissões).

Foram escolhidas as estatísticas médias das variáveis climáticas essenciais precipitação e temperatura, para obtenção de melhor comparativo com a *baseline*. O período analisado escolhido foi 2020 a 2039. As variáveis escolhidas para análise são

oriundas de 16 modelos do CMIP5 (Tabela 6). Todos os cenários de emissão foram avaliados (RCP 2,6; 4,5; 6,0 e 8,5).

A coleção com os 16 modelos, o centro utilizado, a instituição e o país de origem utilizado nas projeções é apresentada na Tabela 5.

**Tabela 5** - Modelos do CMIP5. Fonte: Metadados da plataforma CCKP.

Modelo	Instituição	País
bcc_csm1_1 bcc_csm1_1_m	Centro Climático de Beijing, Administração Meteorológica da China	China
ccsm4	Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica, EUA	EUA
cesm1_cam5	Fundação Nacional de Ciência, Departamento de Energia, Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica, Hawaii	EUA
csiro_mk3_6_0	Organização de Pesquisa Científica e Industrial da Commonwealth em colaboração com o Centro de Excelência em Mudanças Climáticas de Queensland, Austrália	Austrália
fio_esm	Primeiro Instituto de Oceanografia, SOA, China	China
gfdl_cm3 gfdl_esm2m	Laboratório de Dinâmica de Fluidos Geofísica, Estados Unidos	EUA
giss_e2_h giss_e2_r	Instituto Goddard para estudos espaciais (NASA - EUA)	EUA
ipsl_cm5a_mr	Instituto Pierre Simon Laplace	França
miroc_esm miroc_esm_chem	Agência do Japão para o Instituto de Pesquisa e Ciência da Terra-Marinha, Atmosfera e Oceano (Universidade de Tóquio) e Instituto Nacional de Estudos Ambientais	Japão
miroc5	Instituto de Pesquisa Atmosfera e Oceano (Universidade de Tóquio), Instituto Nacional de Estudos Ambientais e Agência do Japão para Ciência e Tecnologia de Terra-Marinha	Japão
mri_cgcm3	Instituto de Pesquisa Meteorológica	Japão
noresm1_m	Centro Climático da Noruega	Noruega

Desse modo, foram obtidos como dados de saída 24 planilhas para as coordenadas da Bacia do Descoberto. (Duas para cada um dos quatro cenários de emissão, para P e para T). Esses dados continham a média mensal de cada um dos modelos do CMIP5 apresentados na tabela 2.

Foi realizada uma análise de médias anuais do conjunto de anos em comparativo com a *baseline*, além de uma breve análise mensal para observação do efeito da variabilidade sazonal. Posteriormente, o modelo hidrológico descrito na sessão seguinte foram aplicados nesses dados.

### 5.2.3 Modelos Hidrológicos

No presente estudo foi escolhido o conjunto de modelos hidrológicos proposto por Gardner, 2009, no qual o autor testou um conjunto de equações para estimar o escoamento total em bacias (R) em função da precipitação (P) e da evapotranspiração potencial média anual (ETP).

O objetivo do trabalho de Gardner foi avaliar se o conjunto de equações testadas era capaz de prever com precisão os valores de escoamento total, além de testar a capacidade de tais modelos hidrológicos na estimativa de futuras mudanças em R associadas aos cenários de mudança climática gerados por GCMs.

Tais equações foram testadas por Gardner (2009) em diversas bacias ao redor do mundo, produzindo resultados acurados. Por esta razão, a metodologia proposta por Gardner foi escolhida para avaliar os modelos gerados pelos GCMs baseados em variações na temperatura e precipitação na bacia do rio Descoberto.

Desse modo, o autor sugere que o escoamento total de longo prazo (R) pode ser estimado em termos da precipitação e evapotranspiração, expresso pela equação 1, abaixo (Gardner, 2009):

$$R = P * \exp\left(\frac{-ETP}{P}\right) \quad (\text{eq. 1})$$

Onde,

R é o escoamento total de longo prazo,

P é a precipitação média anual e

ETP é a evapotranspiração média potencial anual.

Segundo Gardner, a melhor concordância entre o escoamento total previsto e o observado é obtida quando a equação 1 é utilizada em conjunto do método de Holland (1978) para estimar ETP, que é expressa na equação 2:

$$ETP = 1,2 \times 10^{10} * \exp(-4620/Tk) \quad (\text{eq. 2})$$



Onde,

Tk é a temperatura média anual, em Kelvin.

A evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) é descrita pelas metodologias propostas por Budyko (1977), Brutsaert (1982), Ol'dekop (1911) e Schreiber (1904) (apud Gardner 2009), as quais tais autores supõem que a  $ET_0$  pode ser estimada pelas seguintes equações, respectivamente:

$$ET_0 = P * \exp^{(-ETP/P)} \quad (\text{eq. 3}) \text{ ou}$$

$$ET_0 = R - P \quad (\text{eq. 4})$$

As eqs. 1,2, 3 e 4 são baseadas em algumas suposições gerais:

- Num período longo, as mudanças no armazenamento dentro de uma bacia tornam-se insignificantes em comparação com os valores médios anuais de precipitação, evapotranspiração e escoamento. Isso deve ser verdade se não houver tendências seculares significativas em P e T durante o período de registro com o qual o modelo é comparado;
- A água sai da bacia apenas por fluxo direto e evapotranspiração;
- $ET_0$  não pode exceder ETP. Se P for igual a zero, R e evapotranspiração média anual  $ET_0$  também devem ser iguais a zero.

Por fim, para avaliar as mudanças em R dadas as mudanças na em P e T produzida pelos GCMs, as equações 1 e 2 foram diferenciadas usando a regra da cadeia.. Essa equação diferenciada foi utilizada para prever mudanças em R (eq.1) a partir de alterações climáticas futuras em P e T. A forma diferencial das equações é expressa na equação 5, abaixo:

$$dR = \exp^{(-\frac{ETP}{P})} * \left[1 + \frac{ETP}{P}\right] * dP - \left[5544 * 10^{10} * \exp^{(-\frac{ETP}{P})} * \exp^{(-\frac{4620}{Tk}) * TK^{-2}}\right] * dTk \quad (5)$$

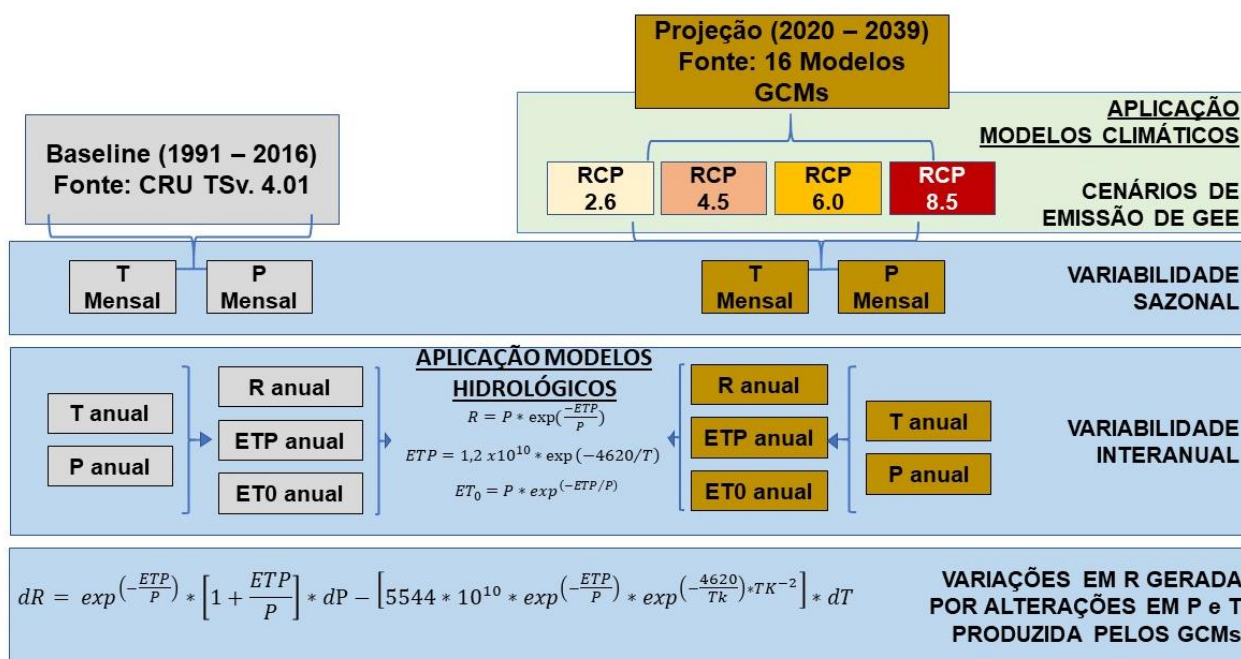
É importante ressaltar que a forma diferencial da eq. 1 dada pela eq. 5 prediz alterações de fluxo e produção de água em médias anuais em um conjunto de anos.

#### 5.2.4 Procedimentos e etapas

Os dados descritos nas seções acima foram avaliados em duas análises distintas:(a) uma abordagem visando observar a variabilidade sazonal, das variáveis precipitação e temperatura mensal e; (b) uma abordagem visando observar a variação

anual, utilizando as variáveis temperatura e precipitação da base de dados CCKP, e as variáveis R, ETP e ET<sub>0</sub>, obtidas a partir da aplicação do modelo hidrológicos supramencionados.

Esse procedimento foi aplicado nos dados históricos (*baseline*) e nas projeções previstas para o período 2020-2039, para os quatro distintos cenários de emissão. A abordagem (a) e a abordagem (b) foram classificadas como “análise sazonal” e “análise interanual”, respectivamente, para melhor compreensão dos resultados obtidos no presente trabalho. A Figura 11 resume os procedimentos e etapas utilizados para obtenção e análise de dados.



**Figura 11** - Fluxograma com as etapas utilizadas na metodologia. Fonte: Elaboração pela autora

Na análise interanual, foi calculada uma regressão linear simples para observar se há tendência linear de acréscimo/decrécimo nas séries obtidas. Quanto mais próximo de 1 o valor de R-quadrado (coeficiente de determinação), maior a correlação entre as variáveis. Além da regressão foi utilizado o estimador média móvel, para observar as possíveis flutuações que ocorrem na análise das séries históricas (e das projeções climáticas). Este método é frequentemente utilizado na correção sazonal de séries de diferente natureza (fluxos econômicos, dados demográficos, dados hidrológicos, etc.) e facilitam a detecção de tendências (VAZ, 2008). Utilizou-se neste trabalho médias móveis para o período de 2 e 4 anos.

Na análise da variabilidade sazonal foi calculado um acréscimo/decréscimo das variáveis precipitação e temperatura mensal ( $\Delta P\%$  e  $\Delta T\%$ ), utilizando um comparativo entre as médias mensais do *baseline* a as médias mensais geradas pelos modelos climáticos. Para essa análise, foi calculada uma média dos 16 modelos GCMs para os 4 cenários RCPs. No apêndice do presente trabalho, são apresentadas as variações de precipitação e temperatura ( $\Delta P\%$  e  $\Delta T\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) geradas por cada modelo para os 4 cenários separadamente, mostrando que alguns modelos apresentam divergências e inconsistências sobretudo na variável precipitação.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

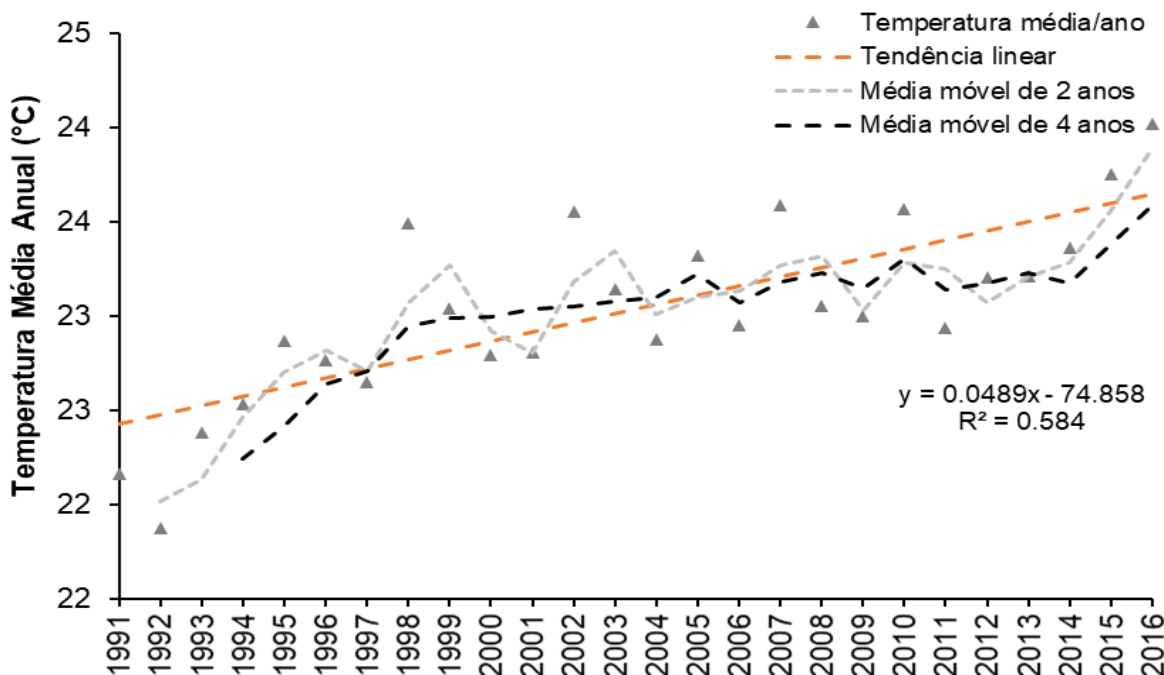
### 6.1 Análise das séries históricas no *baseline*

#### 6.1.1 Temperatura média anual

A série histórica de temperatura média anual na bacia do Rio Descoberto é apresentada na Figura 12. O ano que apresentou a menor temperatura média anual foi o ano de 1992, cuja temperatura atingiu o valor médio de 21,8°C. A maior temperatura média anual ocorreu em 2016, cujo valor médio foi 24,02°C. A média do *baseline* para o período foi de 23,03°C.

A partir da análise da regressão linear, expressa na linha hachurada laranja da Figura 12, é possível observar uma tendência de crescimento na temperatura média anual, com valor R-quadrado equivalente a 0,54. Esse fato pode ser corroborado com o registro da maior temperatura durante o ano de 2016, o último ano da série histórica do *baseline*.

A média móvel para o período de 2 anos apresenta aproximadamente 4 ciclos com picos de ocorrência em anos com altas temperaturas, intercalando com anos os quais a temperatura média anual se apresentou mais baixa.



**Figura 12** - Temperaturas médias anuais no *baseline*. Fonte: Elaboração pela autora

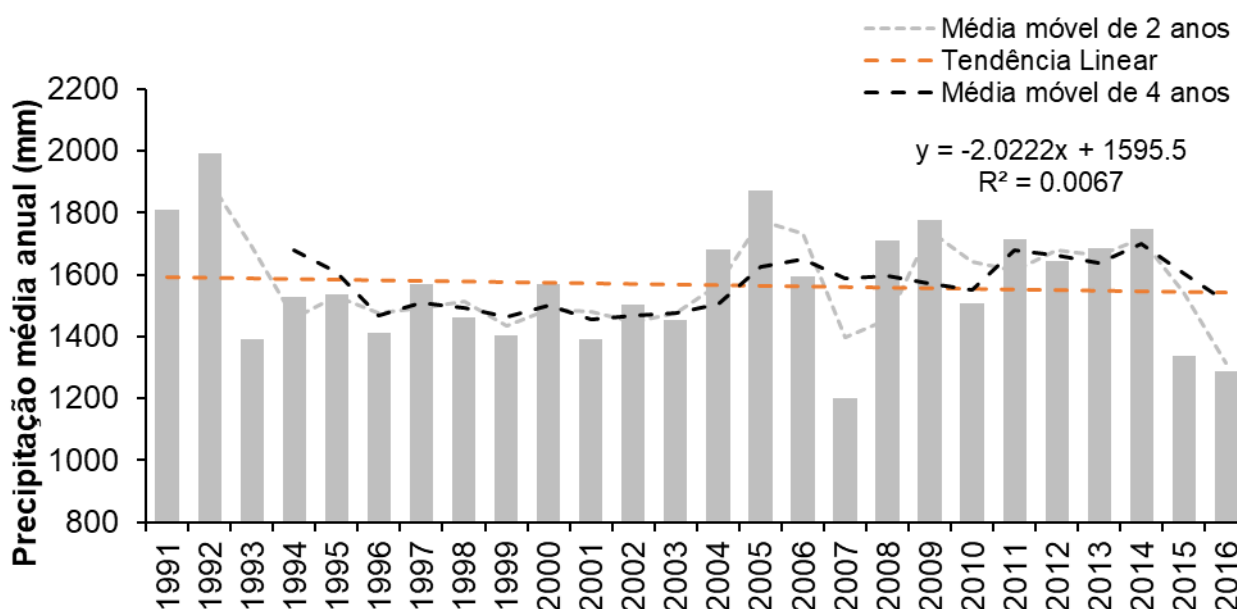
A média móvel para o período de 4 anos não apresenta picos acentuados tão evidentes como a média de 2 anos, mas apresenta um acréscimo elevado no período final da série durante o ano de 2016.

### 6.1.2 Precipitação média anual

A série histórica de precipitação para o *baseline* é apresentada na Figura 13. O ano com o maior volume de chuvas foi o ano de 1992, cuja precipitação média anual foi equivalente a 1990,3 mm. O ano que atingiu menor média histórica de precipitação foi 2007, que obteve 1202,3 mm. A média total do *baseline* obteve o valor de 1568,22 mm.

Em um estudo conduzido por Costa et. Al (2012), os autores analisaram a especialização e sazonalidade da precipitação pluviométrica no estado de Goiás e no Distrito Federal em 107 estações pluviométricas durante o período de 1974 a 2008, e obtiveram o valor de 1529 mm para a média histórica de precipitação. Isso implica em afirmar que tal resultado encontrado para o estado de Goiás inteiro corrobora com o encontrado para a bacia do Rio Descoberto no presente estudo. Os autores sugerem que ocorreu uma redução na ordem de 6,58% da precipitação no DF e em GO, devido a fatores como mudanças no uso e ocupação no solo (acarretando impermeabilização do solo e diminuição da cobertura vegetal).

Observando a regressão linear da precipitação histórica, expressa na linha hachurada laranja da figura abaixo, não se observa acentuado acréscimo ou decréscimo com forte inclinação desta reta. O coeficiente de correlação R-quadrado também é baixo para a série, indicando que não se pode fazer inferências sobre a correlação linear. Entretanto, analisando a média móvel para o período de 2 anos (linha cinza), infere-se que esta apresenta picos de baixa precipitação no ano de 2007 e no ano de 2016, e a que média móvel de 4 anos (linha preta) não apresenta flutuações acentuadas.



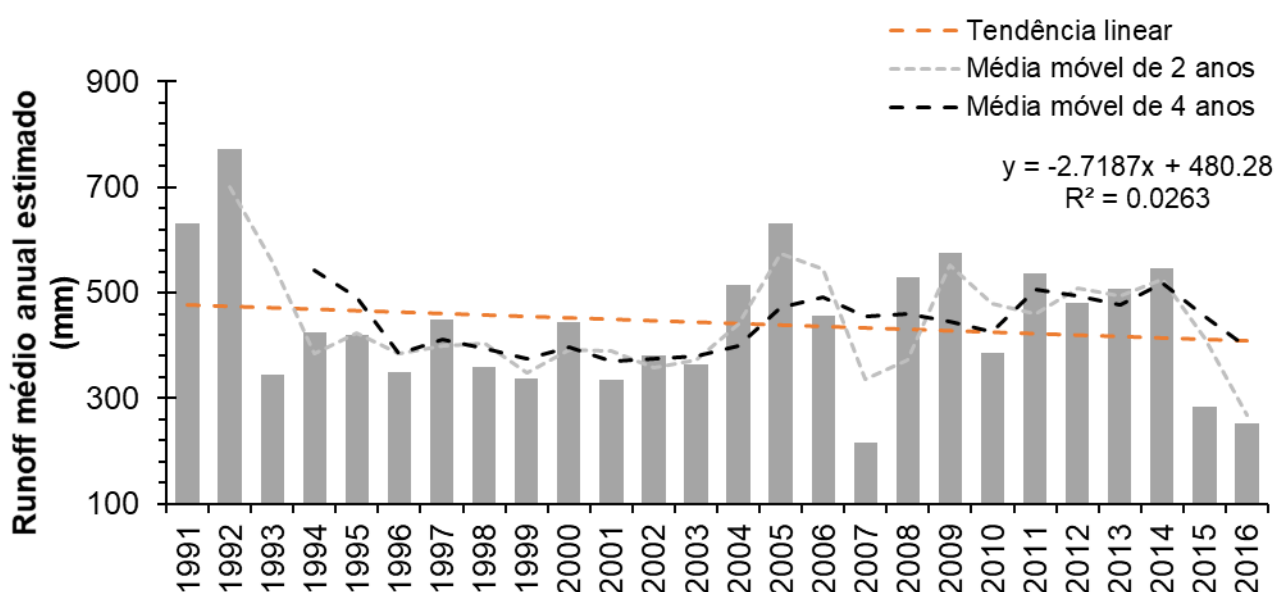
**Figura 13** - Precipitação média anual no *baseline*. Fonte: Elaboração pela autora

## 6.2 Aplicação dos Modelos Hidrológicos no *baseline*

### 6.2.1 Escoamento total anual histórico

A partir da aplicação da modelagem hidrológica proposta por Gardner (2009), o escoamento total anual na bacia do Rio Descoberto é apresentado na Figura 14. No *baseline*, o escoamento total anual (R) apresentou o maior valor durante o ano de 1992, com o valor de 772,82 mm, coincidindo com os maiores valores de temperatura e precipitação para estes anos. O menor valor de R foi encontrado no ano de 2007, equivalente a 216,61 mm. O ano de 2016, também obteve um valor reduzido, de 251,36 mm, segundo as estimativas dos modelos hidrológicos.

A regressão linear para o escoamento total anual apresenta baixo valor de correlação, não podendo ser possível afirmar que há acréscimo/decréscimo na série histórica. Analisando os ciclos da média móvel para o período de 2 anos, observamos que a série apresenta flutuações durante o período analisado, apresentando picos de acréscimo em 2005, 2009 e 2014, e acentuado decréscimo em 2007 e 2016. A média móvel de 4 anos apresenta comportamento semelhante à média móvel de 2 anos, com suaves flutuações em quase toda série histórica. Ambas apresentam decaimento representativo entre 2015 e 2016.

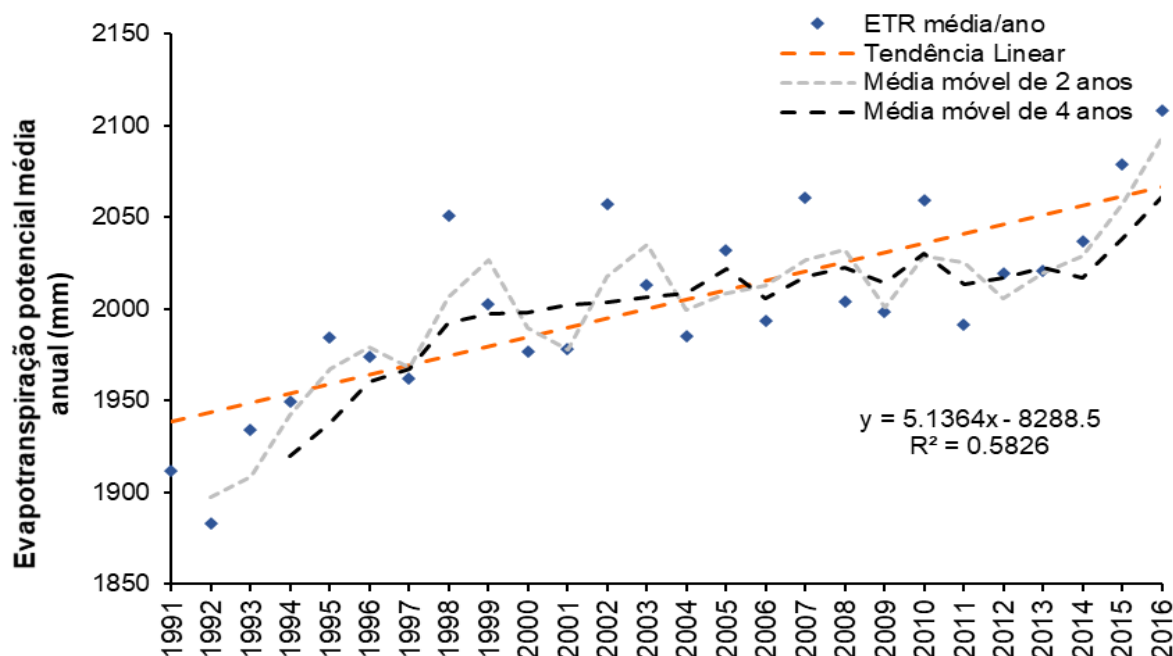


**Figura 14** – Escoamento total anual estimado no baseline. Fonte: Elaboração pela autora

### 6.2.2 Evapotranspiração potencial média anual histórica

A figura que expressa a evapotranspiração potencial média anual estimada (ETP), em mm para o *baseline* é apresentada na Figura 15. O menor valor encontrado durante a série histórica foi no ano de 1992, atingindo o valor de 1202,3 mm. Já o maior valor ocorreu em 2016, ano em que teve a maior temperatura média anual registrada, atingindo a marca de 1990,3 mm. O valor médio estimado da ETR para o período foi 1568,22 mm.

É observado que a ETP apresenta uma tendência linear crescente, com valor de R-quadrado igual a 0,59. As flutuações da média móvel para o período de 2 anos apresentam 4 picos ascendentes em 1999, 2007, 2010 e 2016. Isto provavelmente se deve ao fato que o modelo hidrológico empregado correlaciona a ETP com a temperatura. Logo, o gráfico de ETP é também semelhante ao gráfico de temperatura média anual.



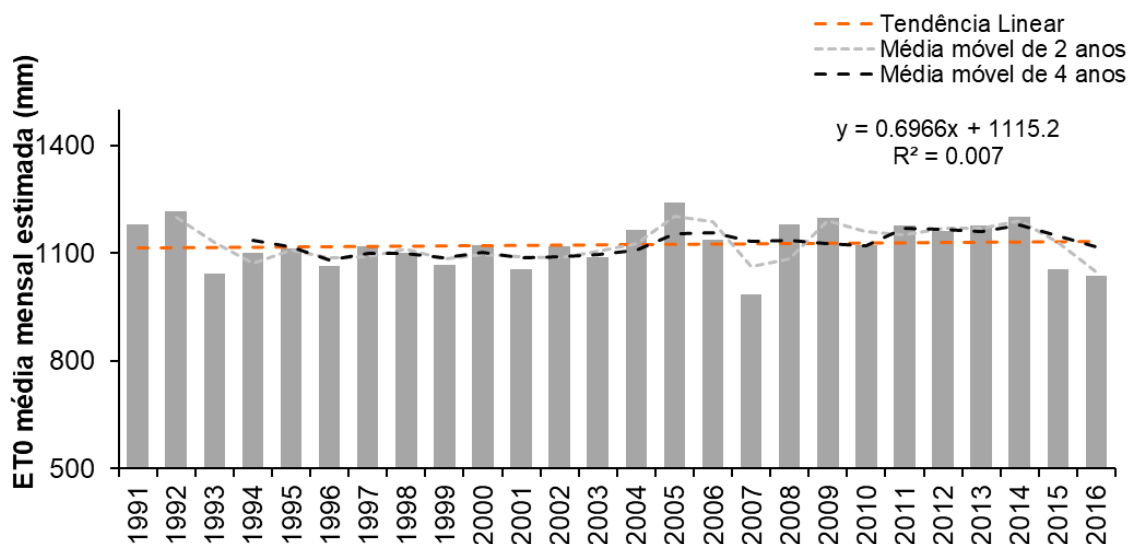
**Figura 15** - ETP anual média estimada no baseline. Fonte: Elaboração pela autora

### 6.2.3 Evapotranspiração de referência histórica

A evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) para o período histórico analisado é apresentada na Figura 16. O menor valor encontrado durante a série histórica foi no ano de 1992, atingindo o valor de 1882,80 mm. Já o maior valor ocorreu em 2016, ano em que teve a maior temperatura média anual registrada, atingindo a marca de 2107,99 mm. O valor médio estimado da  $ET_0$  para o período foi 2002,4 mm.

A  $ET_0$  está fortemente correlacionada com o escoamento total anual e a precipitação. É observado, entretanto que a regressão linear não apresenta flutuações e não é representativa devido ao baixo valor encontrado de R-quadrado. Também não é possível fazer inferências sobre a flutuação das médias móveis no *baseline* para esta variável.

Tanto na análise da série histórica para precipitação e temperatura quanto na estimativa feita pelos modelos hidrológicos, observou-se que nos anos de 1991, 1992, 2005 e 2009 a precipitação apresentou seus maiores valores, todos acima da média histórica de 1568,22 mm. Em contrapartida nos anos de 1993, 2007, 2015 e 2016, ocorreram os menores valores de precipitação média anual para a série.



**Figura 16** - ET0 média anual estimada no baseline. Fonte: Elaboração pela autora

As temperaturas médias anuais foram mais altas nos anos de 1998, 2007, 2010 e 2016. E atingiu os menores valores nos anos de 1991, 1992 e 1993. As projeções de R, ETP e  $ET_0$  obtidas a partir da aplicação dos modelos hidrológicos acompanharam flutuações máximas e mínimas de precipitação e temperatura semelhante as variações de P e T.

É válido destacar brevemente a influência de fenômenos atmosféricos-oceânicos para a ocorrência destes escores de temperatura e precipitação no período histórico estudado, ressaltando-se o fenômeno *El-niño*/Oscilação Sul (ENOS). O *El-niño* com maior intensidade (desde que se observa e se registra este tipo de fenômeno) ocorreu entre 1997-1998. A Tabela 6 mostra a cronologia de ocorrências do fenômeno e a respectiva intensidade deste.



**Tabela 6** - Períodos de ocorrência de El-niño e intensidade dos eventos

<b>Período de El-niño</b>	<b>Intensidade do evento</b>
1990-1993	Forte
1994-1995	Moderada
1997-1998	Forte
2002-2003	Moderada
2004-2005	Fraca
2006-2007	Forte
2009-2010	Moderada
2015-2016	Forte
2018-2019	Fraca

Fonte: Adaptado de Minuzzi (2005)

O fenômeno *El niño* altera o clima regional e global, mudando os padrões de vento a nível mundial, afetando assim, os regimes de chuva em regiões tropicais e de latitudes médias.

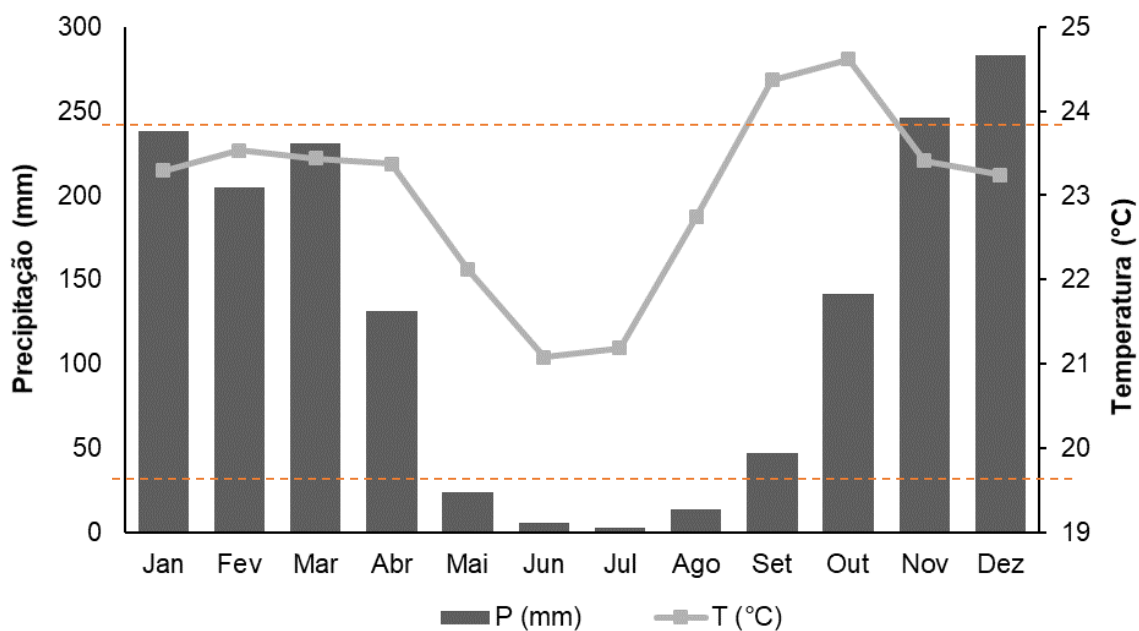
#### **6.4 Análise sazonal no *baseline***

A Figura 17 apresenta os valores médios mensais de temperatura e precipitação para o *baseline* (1991 – 2016). Para melhor compreensão sazonal destes fenômenos, estes serão divididos em dois períodos: (a) período úmido (outubro a abril, onde ocorre maior intensidade de chuvas e maiores temperaturas) e (b) período seco (maio a setembro, onde ocorre menores temperaturas e menor volume e intensidade de chuvas).

Durante o período seco, a precipitação atinge seus valores médios mensais mais baixos, com a média de 18,57 mm para o período (linha hachurada inferior laranja). O mês de julho apresenta o valor mais baixo da série histórica mensal, 13,47 mm. No período chuvoso a precipitação atinge a média de 210 mm (linha hachurada superior laranja), atingindo o maior valor de precipitação durante o mês de dezembro, 283,51 mm.

No período úmido ocorre fortes influências da massa de ar Equatorial Continental (Ec) advinda da Amazônia. Durante esse período a precipitação pode atingir valores máximos de 2.300 mm na região norte do estado de Goiás (Costa et. al, 2012). A menor intensidade e volume de precipitação no período seco é um fato comum nas regiões centro-oeste e sudeste do Brasil. Segundo Silva (2000), Essa variação sazonal na precipitação pode ser explicada devido a massa Tropical Atlântica

(Ta) sofrer efeitos orográficos de precipitação e bloqueios atmosféricos sobre a parte central do Brasil, chovendo intensamente nas bordas da massa de ar, mas não no centro do continente, que abrange a região do Cerrado.



**Figura 17** - Precipitação e temperatura mensais no período *baseline* (1991-2016)

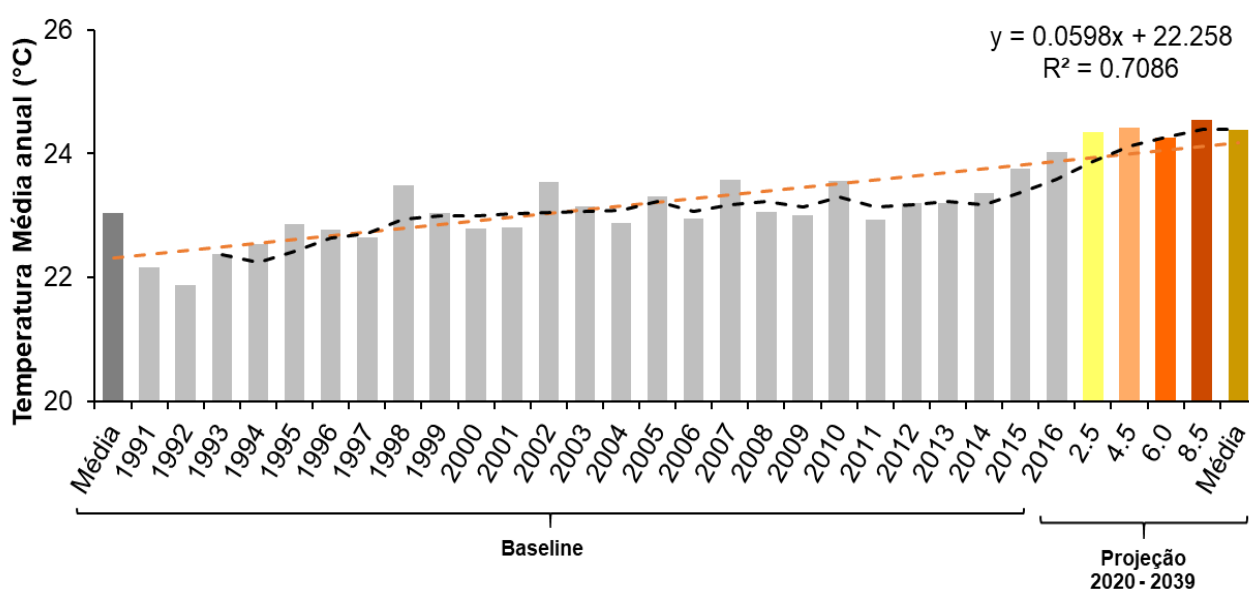
## 6.5 Análise das estimativas geradas pelos GCMs

### 6.5.1 Temperatura média anual projetada

Na figura 18 são apresentadas as projeções para a temperatura média anual na bacia do rio Descoberto. O RCP 2.6 possui uma tendência ao acréscimo na temperatura média anual na ordem de 5,68% ou 1,3°C absolutos. O RCP 4.5, possui tendência na ordem de 5,69% ou 1,38°C absolutos. O RCP 6.0, prediz projeções na temperatura na ordem de 5,02% ou 1,23°C. Por fim, o cenário mais pessimista, RCP 8,5, prediz projeções climáticas na temperatura média anual de 6,21% ou 1,5°C em média, para o período de 2020 a 2039.

Em comparativo com a média do período *baseline*, haveria uma tendência de acréscimo na temperatura média anual para todos os cenários na ordem de 5,89%, ou 1,3°C.

A regressão linear apresenta tendência ao acréscimo de temperatura, com o valor de R-quadrado na ordem de 0,7, confirmando que há correlação entre as variáveis. A média móvel para o período de 4 anos apresenta flutuações acentuadas durante todo o período, e tendência ao crescimento a partir do ano de 2015.



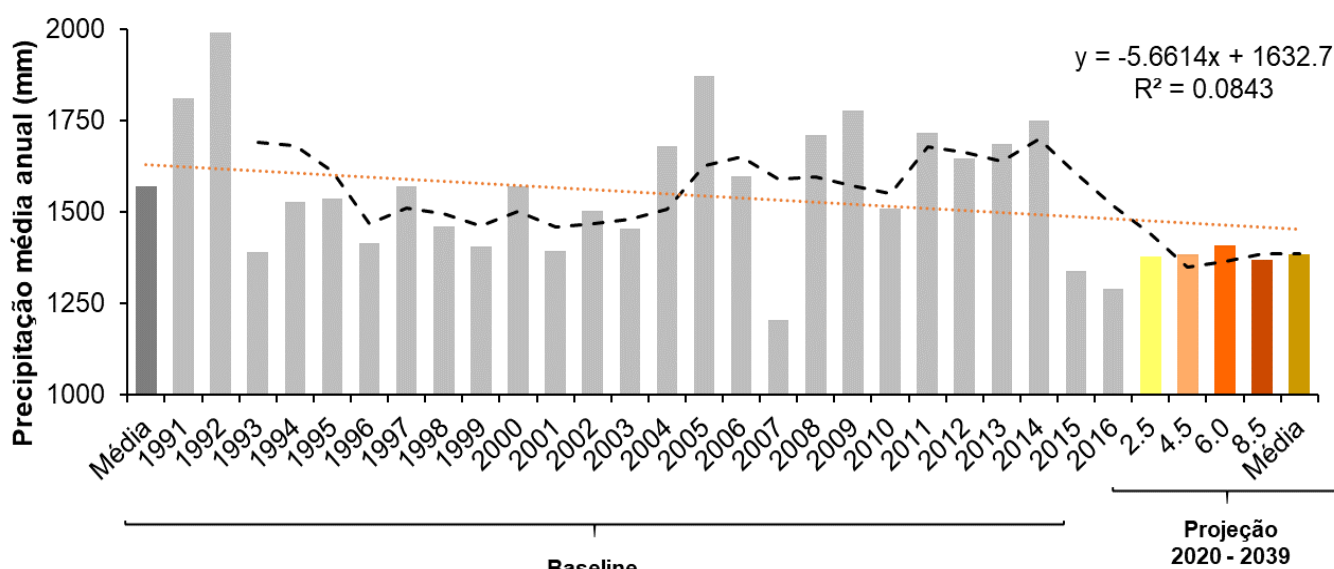
**Figura 18** - Temperatura média anual das projeções comparadas com o baseline

### 6.5.2 Precipitação média anual projetada

Na Figura 19 são apresentadas as tendências da variável precipitação média anual na bacia do rio Descoberto. Foram obtidas tendências a diminuição na ordem de 14,35% na precipitação para o período 2020-2039.

A regressão linear não é conclusiva sobre a correlação entre as variáveis, não apresentando uma confirmação acerca do acréscimo ou decréscimo da precipitação média anual em um comparativo do *baseline* com as projeções históricas. A precipitação, entretanto, possui o efeito da variabilidade sazonal, interanual e plurianual, e costuma não apresentar uma tendência linear na maioria dos casos. No presente estudo, o valor de R-quadrado foi de 0,04, corroborando que não é possível inferir que há correlação entre o *baseline* e as projeções para 2020-2039.

Entretanto, ao observarmos a média móvel para o período de 4 anos, é possível observarmos que ocorrem flutuações na média da precipitação em pelo menos 6 ciclos do período estudado. A janela de 4 anos entre o último ano do *baseline* e o primeiro ano da projeção climática (2016 – 2020) apresenta tendência a um decréscimo na precipitação na ordem de 12%.



**Figura 19** - Precipitação média anual das projeções comparadas com o *baseline*

## 6.6 Aplicação dos Modelos Hidrológicos

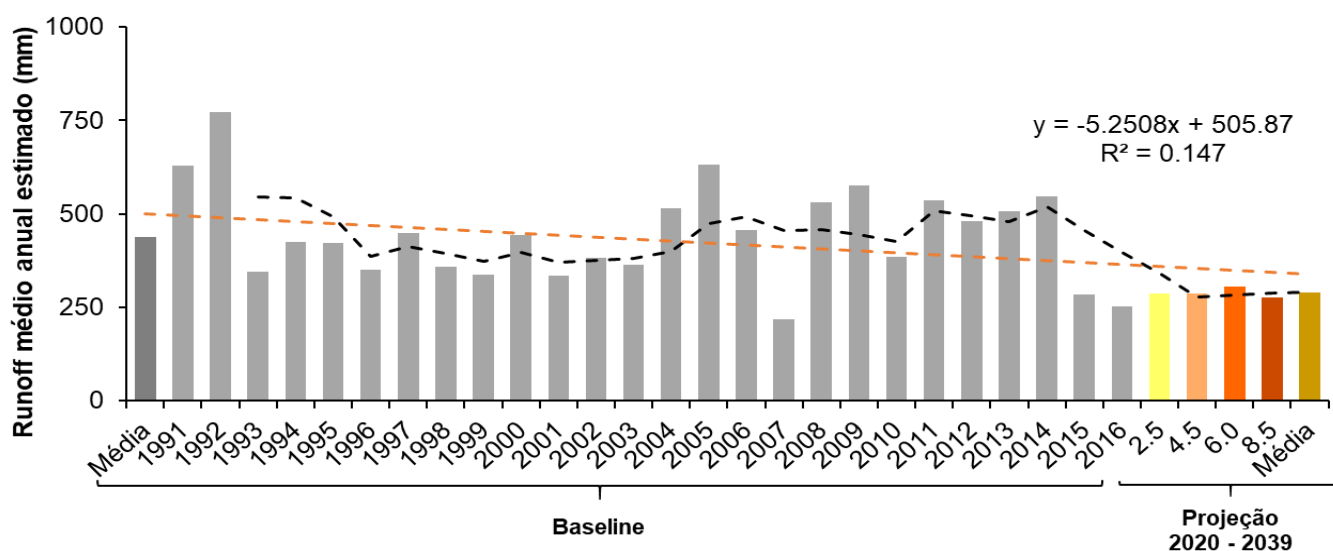
### 6.6.1 Escoamento total anual estimado

O escoamento total anual na bacia do Rio Descoberto é apresentado na Figura 20. Os resultados obtidos pelas projeções futuras apontam uma diminuição no escoamento na ordem de 15%, em comparação com a média do *baseline*. O cenário RCP 8.5 (mais severo com relação ao nível de emissões) apresenta menor diminuição da vazão.

Tucci (2002) ressalta a proporcionalidade como os valores de precipitação se relacionam com os de vazão, pois a alteração da precipitação apresenta impacto relativo diferenciado sobre a vazão da bacia hidrográfica. Nos anos com valores extremos (inundações e secas) a resposta da bacia se amplifica com relação a variação adimensional da precipitação.

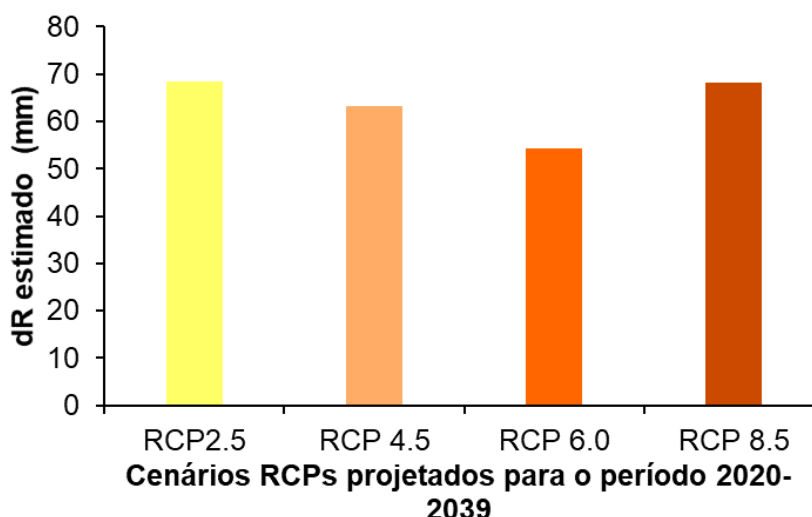
A regressão linear para o escoamento total anual apresenta baixo valor de correlação, não podendo ser possível afirmar que há acréscimo/decréscimo no valor de R para o *baseline* em comparativo com as projeções futuras. Analisando os ciclos da média móvel para o período de 2 anos, observamos que a série apresenta acentuado decréscimo a partir do ano de 2014 para a vazão simulada.

A Figura 21 apresenta os valores diferenciais de R para cada um deles, indicando que os cenários 4,5 e 6.0 apresentaram as menores reduções em R. Silva et al (2018) em um estudo conduzido no estado de Goiás, obteve resultados



**Figura 20** – Escoamento total anual estimado do baseline e das projeções geradas pelos diferentes RCPs

semelhantes com relação a variação entre os cenários. No estudo da autora, o RCP 6.0 obteve menores valores nas variáveis hidrológicas avaliadas.

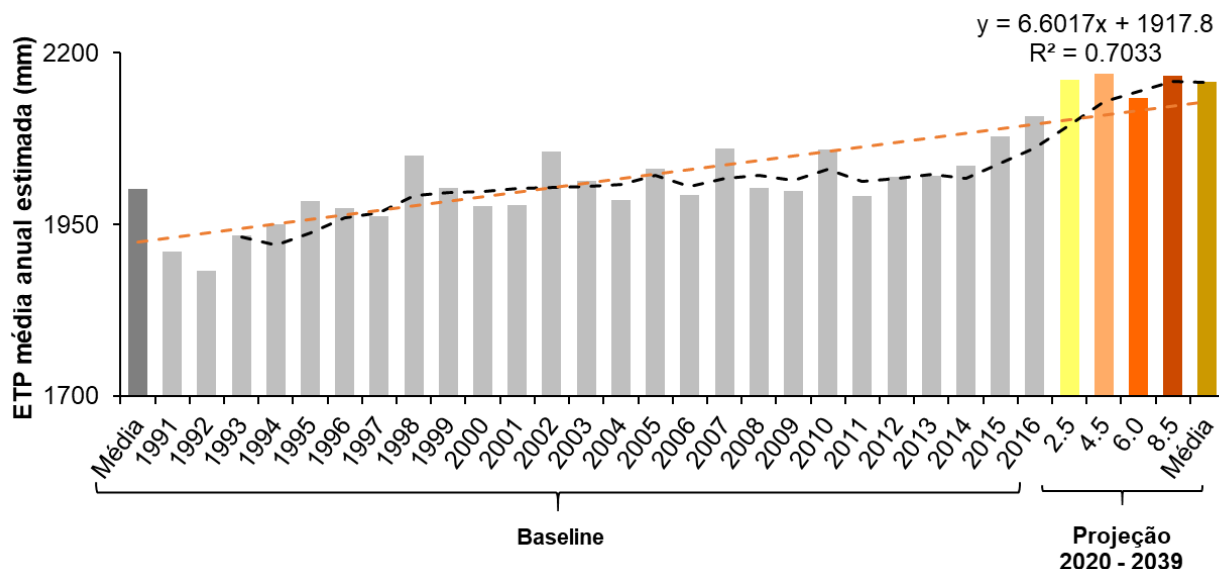


**Figura 21** - Variações no escoamento total anual nos diferentes cenários RCPs

#### 6.6.2 Evapotranspiração potencial média anual estimada

A comparação da série histórica com a projeção futura para a variável ETP é apresentada na figura 22. Os resultados apontam que ocorrerá um possível aumento da ETP sob o efeito das mudanças climáticas para todos os cenários RCPs, na ordem de 7,97% em comparativo com o *baseline*. O cenário RCP 4.5 apresentou os maiores valores de incremento para a variável ETP, mas os resultados foram semelhantes aos encontrados ao RCP 2.6 e 8.5. O RCP 6.0 apresentou valores abaixo da média dos demais RCPs.

A tendência linear crescente é confirmada pelo alto valor encontrado de R-Quadrado (0,70). Portanto, é possível afirmar que haverá um aumento da ETP do *baseline* em comparativo com a projeção esperada para o período 2020-2039. O aumento da ETP pode refletir em uma maior necessidade de água para irrigação. Junior et. al (2018, p. 16), afirmam que o “aumento desta variável indica que medidas precisam ser adotadas para minimizar a emissão de gases do efeito estufa e os impactos das mudanças climáticas, em busca de reduzir a vulnerabilidade dos sistemas hídricos brasileiros e minimizar o acirramento dos conflitos pelo uso da água no país.”

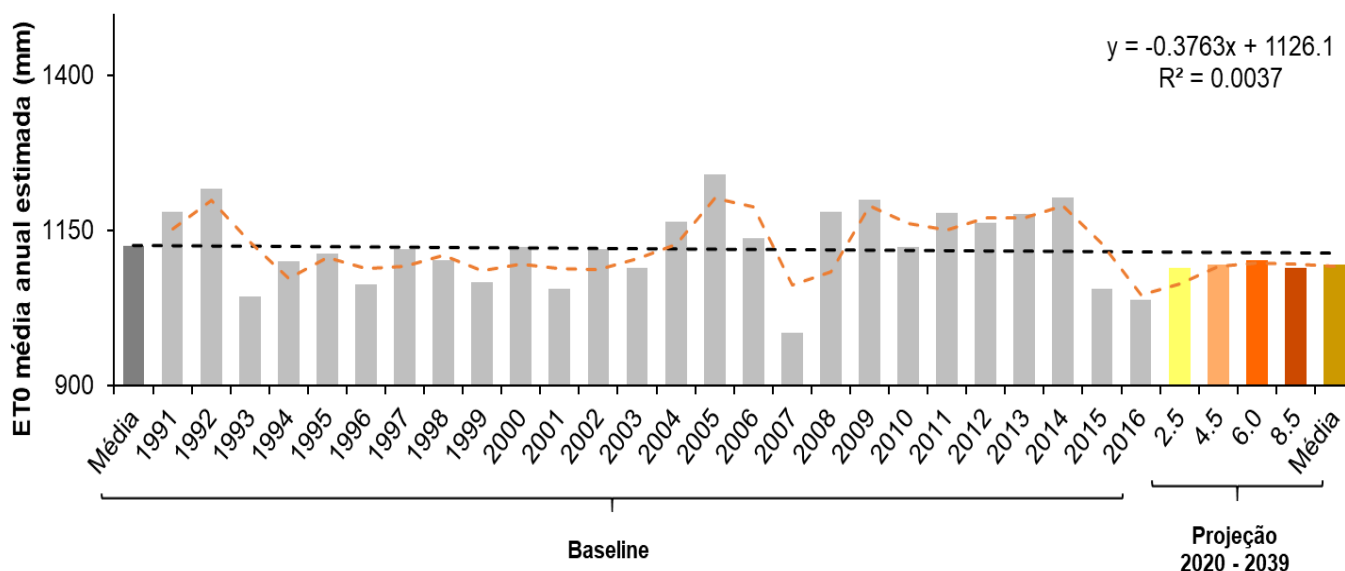


**Figura 22** - ETP média anual estimada do *baseline* em comparação com as projeções geradas pelos diferentes RCPs

### 6.6.3 Evapotranspiração de referência média anual estimada

A  $ET_0$  estimada projetada em comparativa com o *baseline* é apresentada na figura 23. Os resultados apontam para uma redução na ordem de 2,69% para a variável no período 2020-2039 para todos os cenários. Para esta variável, todos os cenários apontam comportamento semelhante, contudo o RCP 6.0 apresentou média estimada 1,79% superior aos demais cenários.

A regressão linear com baixo valor de R-quadrado sugere que não é possível inferir se haverá um acréscimo/decrécimo robusto de tal variável ao realizar a comparação do *baseline* com as projeções futuras.



**Figura 23** - ET0 média anual estimada do *baseline* em comparação com as projeções geradas pelos diferentes RCPs

## 6.7 Análise sazonal para o período 2020-2039

É incomum uma análise individual e detalhada de cada modelo GCM em trabalhos que observam as o efeito das mudanças climáticas em uma determinada região de interesse. O que ocorre, na maioria dos casos é uma análise global do efeito das mudanças climáticas e uma tentativa de utilizar a técnica *downscaling*<sup>1</sup> para observar a variação ou incremento gerado pela projeção de determinada variável em um cenário específico de emissão. Existe uma grande quantidade de modelos de mudanças climáticas globais do CMIP5, e em muitos casos ocorrem algumas divergências com relação a estimativa das projeções, sobretudo da variável precipitação.

Para o presente trabalho, o objetivo é observar o efeito das mudanças em escala geral, sem uma discussão mais detalhada das anomalias de projeção (sobretudo da variável precipitação) gerada por alguns modelos específicos. Entretanto, na seção apêndice são apresentadas as anomalias de precipitação e temperatura gerada para cada modelo. Nela, é possível observar que alguns modelos, como o miroc5 do Japão, preveem um aumento da precipitação na ordem de 80%, em todos os cenários, o que é algo improvável que aconteça.

Silveira et. al (2013), realizaram uma avaliação detalhada do desempenho de 7 modelos GCMs do CMIP5 no cenário RCP 8.5 em três macrorregiões da América Latina (Nordeste Brasileiro, Amazônia e Bacia do Prata). Os autores realizaram uma avaliação robusta e detalhada dos modelos selecionados nas escalas sazonal, interanual e interdecadal, com o objetivo de testar a eficácia destes modelos e selecionar quais seriam os mais adequados para prever o efeito das mudanças climáticas. A partir desta análise, concluíram que cada macrorregião possuiria então uma seleção de modelos adequados para prever as projeções climáticas. Os autores, após uma série de critérios e avaliações excluíram da modelagem os modelos que divergiam os resultados e apresentavam incertezas.

Adam e Collischonn (2013), testaram a eficácia de 20 modelos de GCMs para 3 cenários de emissão na bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí (RS), e encontraram uma

---

<sup>1</sup> Downscaling é o nome geral de um procedimento para obter informações conhecidas em larga escala para fazer previsões em escalas locais. As duas principais abordagens para reduzir a informação climática são dinâmicas e estatísticas. (NCAR, 2019)



grande discrepância relacionada as incertezas das projeções climáticas, sobretudo nos regimes de precipitação e vazão. Os autores concluíram que entre o conjunto dos 20 GCMs, há discordância quanto ao comportamento da variável precipitação, não sendo possível inferir se ela irá aumentar ou diminuir no futuro, segundo os modelos testados. Paiva e Collischonn (2010), avaliaram o impacto das mudanças climáticas na bacia do rio Quaraí utilizando seis modelos climáticos GCMs do CMIP5 em três cenários diferentes, e também encontraram incertezas quanto à discrepância da variável precipitação nos dados gerados pelos modelos de GCMs.

Os estudos citados acima, entretanto não abrangem a área de estudo do presente trabalho, mas foram citados a fim de que se obtenha um panorama sobre o que é encontrado na literatura acerca dos estudos sobre os modelos dos GCMs. Os três estudos utilizaram metodologia semelhante a utilizada no presente trabalho.

Em um estudo conduzido em todo o estado de Goiás, Silva et. al (2018), empregaram um conjunto de 12 modelos climáticos para quatro diferentes RCPs, com o objetivo de observar as tendências do aumento da temperatura média do ar no período de 2020-2045. Os autores utilizaram quatro métodos (coeficiente angular, análise de década, incremento de temperatura e temperaturas extremas), baseando-se nas temperaturas máximas e mínimas. Encontram que, para todos os métodos, há uma tendência ao aumento na temperatura de média do ar para todos os RCPs, exceto o RCP 6.0, que apresentou menor projeção de aumento da temperatura diante dos outros. Esse resultado que apresenta um comportamento diferenciado do cenário RCP 6.0 também foi encontrado no presente trabalho (Figura 21).

Zullo e Pereira (2018), conduziram um estudo visando observar o efeito das projeções climáticas geradas pelo CMIP5 e quais seus impactos na macrorregião centro-sudeste do Brasil, além de mensurarem a vulnerabilidade gerada pelas mudanças climáticas no setor de produção de cana de açúcar. Os autores realizaram a simulação de 8 modelos no cenário de RCP 8.5 e dividiram a macrorregião em zonas de risco climático e posteriores recomendações de irrigação, visando a produção de cana de açúcar. O norte de goiás foi considerado uma região de alto risco climático, e a região central, que engloba a bacia do rio Descoberto, foi classificada como uma região de irrigação recomendada, em função das baixas precipitações futuras segundo as projeções.

Silva e Bastos (2019) empregaram os modelos do CMIP5 em três cenários RCPs (2.6, 4.5 e 8.5) para avaliar as tendências atuais e futuras de risco de incêndios e área queimada em todo o Cerrado brasileiro. As autoras utilizaram classificações meteorológicas para produzir modelos climáticos e desenvolveram um modelo para prever as áreas queimadas a partir de um classificador de gravidade diária (DSR). As autoras concluíram que poderá ocorrer um aumento estatístico das áreas queimadas em todos os cenários empregados até 2050, mas no cenário RCP 2.6 poderia ocorrer uma diminuição de 11% áreas queimadas até o ano de 2100.

#### 6.7.1 Temperatura mensal projetada

A resposta dos modelos GCMs à variabilidade sazonal é apresentada para os cenários RCPs (2.5, 4.5, 6.0 e 8.5) para a variável temperatura mensal (Figura 22) e para a variável precipitação mensal (Figura 23).

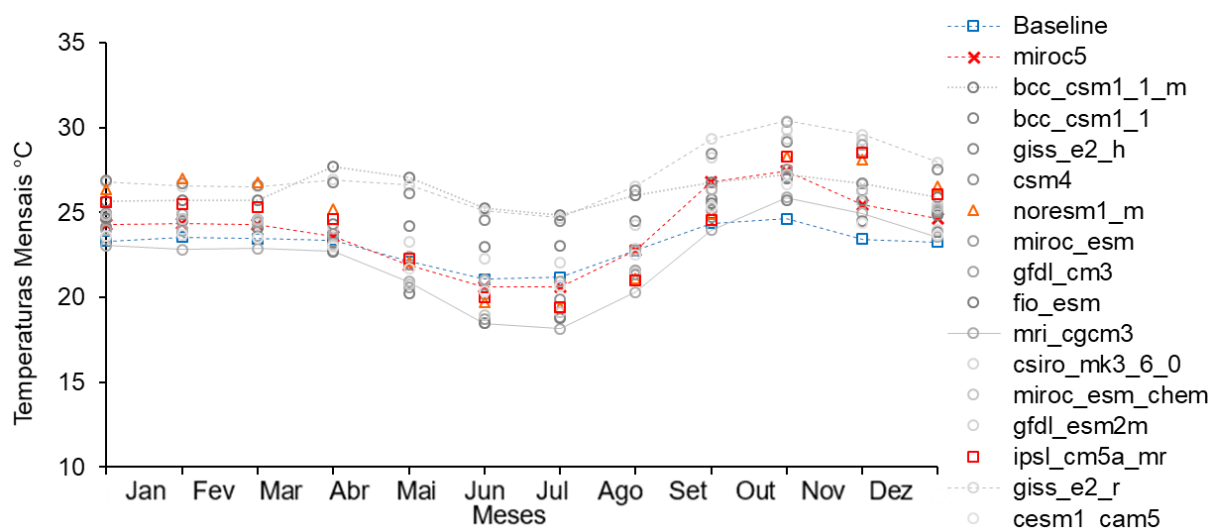
Para melhor compreensão da análise da variabilidade sazonal, são apresentados na Tabela 7 as medidas de dispersão da variável temperatura média mensal, comparando-as entre as médias mensais do *baseline* e as médias mensais apresentadas pelos 16 modelos climáticos.

As projeções na Tabela 8 sugerem uma tendência ao acréscimo na temperatura média anual para a maioria dos meses, exceto para o mês de julho, o qual sugere-se uma diminuição de 1,01 % da temperatura média anual.

**Tabela 7** - Medidas de dispersão para a variável temperatura (°C)

Mês	Baseline (1991-2016)			GCMs (2020-2039)			Variação	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$CV$	$\bar{x}$	$\sigma$	$CV$	$\Delta T$	$\Delta T$ (%)
<b>Jan</b>	23.29	0.66	0.03	24.85	1.15	0.05	1.56	6.69
<b>Fev</b>	23.53	0.73	0.03	24.89	1.15	0.05	1.36	5.78
<b>Mar</b>	23.44	0.57	0.02	24.76	1.13	0.05	1.32	5.65
<b>Abr</b>	23.37	0.69	0.03	24.26	1.59	0.07	0.88	3.78
<b>Mai</b>	22.12	0.57	0.03	22.77	2.14	0.09	0.65	2.94
<b>Jun</b>	21.07	0.71	0.03	21.09	2.29	0.11	0.02	0.10
<b>Jul</b>	21.19	0.72	0.03	20.97	2.21	0.11	-0.21	-1.01
<b>Ago</b>	22.74	0.78	0.03	22.91	2.02	0.09	0.17	0.76
<b>Set</b>	24.37	0.95	0.04	26.09	1.52	0.06	1.72	7.06
<b>Out</b>	24.62	1.03	0.04	27.96	1.48	0.05	3.34	13.57
<b>Nov</b>	23.41	0.63	0.03	26.84	1.75	0.07	3.43	14.66
<b>Dez</b>	23.25	0.70	0.03	25.27	1.29	0.05	2.03	8.71

Na figura 24 abaixo, é observado a tendência da variação sazonal apresentada por cada um dos 16 modelos GCMs. O modelo giss\_e2\_r apresentou maiores valores, enquanto o modelo mri\_cgcm3 apresentou menores.



**Figura 24** – Temperatura média mensal (°C) estimada pelos modelos climáticos para o período (2020-2039)

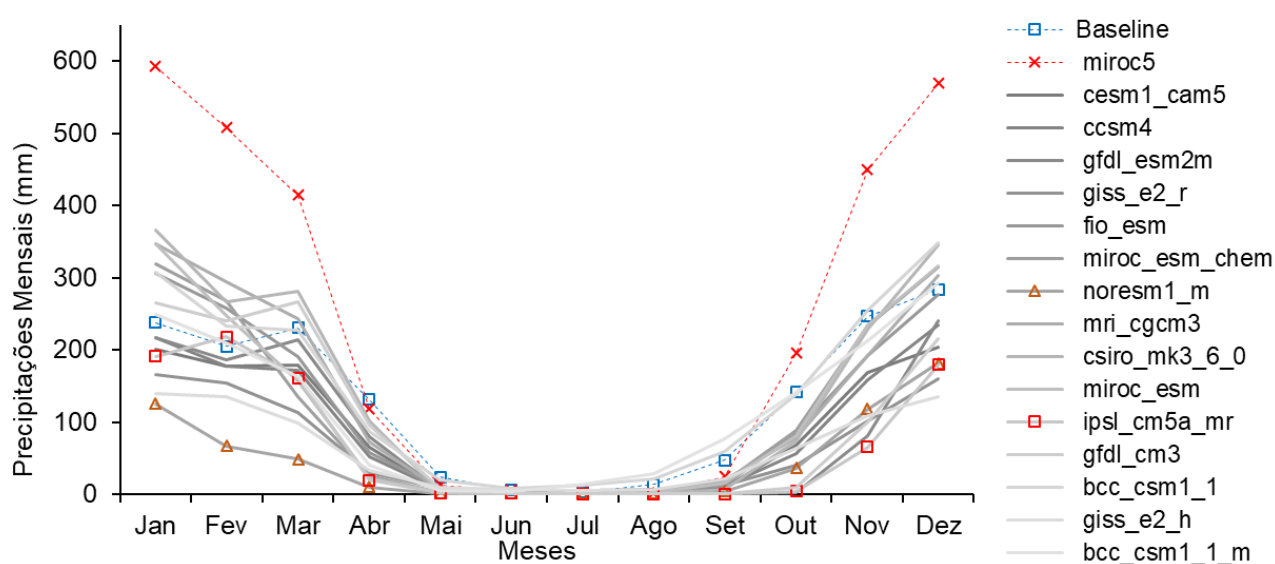
#### 6.7.2 Precipitação mensal projetada

Quanto à variação sazonal da precipitação das projeções em comparação com o *baseline*, é observada uma diminuição da precipitação para quase todos os meses do ano, exceto janeiro e fevereiro, que foi encontrado um acréscimo de 13,57% e 10,61% respectivamente. Os dados que sintetizam as medidas de dispersão para a variável precipitação média anual estão apresentados na Tabela 8 abaixo.

**Tabela 8** - Medidas de dispersão para a variável precipitação (mm)

	Baseline (1991-2016)			GCMs (2020-2039)			Variação	
Mês	$\bar{x}$	$\sigma$	CV	$\bar{x}$	$\sigma$	CV	$\Delta P$	$\Delta P$ (%)
Jan	237.87	99.75	0.42	270.14	111.02	0.41	32.27	13.57
Fev	204.50	72.81	0.36	226.19	92.01	0.41	21.69	10.61
Mar	230.63	93.74	0.41	193.88	83.28	0.43	-36.75	-15.94
Abr	131.02	75.10	0.57	61.25	36.55	0.60	-69.78	-53.26
Mai	24.00	17.43	0.73	7.84	6.18	0.79	-16.16	-67.34
Jun	5.70	8.20	1.44	3.12	2.48	0.79	-2.57	-45.20
Jul	2.55	4.31	1.69	3.41	4.01	1.18	0.86	33.60
Ago	13.47	17.73	1.32	5.79	8.17	1.41	-7.68	-57.02
Set	47.16	31.64	0.67	19.95	21.61	1.08	-27.21	-57.70
Out	141.60	72.39	0.51	76.73	53.27	0.69	-64.87	-45.81
Nov	246.22	57.12	0.23	185.10	92.34	0.50	-61.12	-24.82
Dez	283.51	86.46	0.30	270.55	100.98	0.37	-12.96	-4.57

Observando a figura 25, que resume o comportamento de cada modelo para a variável precipitação, é possível analisar que há uma discrepância entre eles, pois alguns projetam um aumento da temperatura mensal com uma notória superestimação (miroc5), enquanto outros modelos (e a maioria destes) projetam uma diminuição desta variável. Tais discrepâncias quanto as incertezas da projeção da precipitação são comumente encontradas em outros trabalhos de análise de modelos de projeção climática (Silveira et. al 2013; Adam e Collischonn 2013), não havendo uma concordância na literatura sobre como estimar tal variável com precisão.



**Figura 25** - Precipitação média mensal (mm) estimada pelos modelos climáticos para o período (2020-2039)

## 7. CONCLUSÕES

- A temperatura média anual na bacia do Descoberto apresenta uma tendência de aumento de 1,3°C (5,9% em comparação com o *baseline*) para o período de 2020 a 2039, em todos os cenários RCPs analisados.
- Devido a divergências geradas por anomalias de precipitação apresentadas entre os modelos do CMIP5 para todos os RCPs, não é possível afirmar o que ocorrerá com a variável precipitação na bacia do Rio Descoberto em um cenário futuro. Entretanto, essa variável apresenta o efeito da variabilidade sazonal que ocorre na região do Cerrado.
- Os resultados obtidos a partir do modelo proposto por Gardner para estimar escoamento total a partir das projeções futuras geradas pelos GCMs, apontam para uma diminuição na ordem de 15% em comparação com a média do *baseline*. O cenário RCP 8.5 (mais severo com relação ao nível de emissões) apresentou menor diminuição desta variável.
- Os resultados apontam que ocorrerá um possível aumento da ETP na bacia do Rio Descoberto sob o efeito das mudanças climáticas para todos os cenários RCPs, na ordem de 7,97% em comparativo com o *baseline*.
- Com relação a ET0, foram encontrados tendências para redução na ordem de 2,69% para a variável no período 2020-2039 em todos os cenários RCPs.
- A análise da variação sazonal na bacia estimada para o período futuro indica que deverá ocorrer aumento da temperatura em todos os meses do ano, com exceção do mês de julho, cujos modelos apontaram para uma possível diminuição desta variável.
- A variável precipitação mensal apresentou maior variabilidade/incerteza nos modelos, não sendo detectada tendência significativa de acréscimo ou diminuição desta variável na bacia.
- Com base nos resultados obtidos, acredita-se que as incertezas encontradas sobretudo para a variável precipitação, sejam diminuídas com uma etapa de pós-seleção dos modelos mais adequados (menos tendenciosos) para a área de estudo.

## 8. REFERÊNCIAS

- ADAM, K. N.; COLLISCHONN, W. Análise dos impactos de mudanças climáticas nos regimes de precipitação e vazão na bacia hidrográfica do rio Ibicuí. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 69-79, 2013.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Hidrologia Básica. **Material didático**. 55 p, 2012. Disponível em: <<https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/66>>. Acesso em 18 nov. 2019
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos: avaliações e diretrizes para adaptação / Agência Nacional de Águas. – Brasília: ANA, **GGES**, 93 p, 2016.
- ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Variabilidade, anomalia e mudança climática. **Material didático**, ESALQ/USP, p. 1–8, 2007.
- ARCOVA, F.C.S.; CICCIO, V. Características do deflúvio de duas microbacias hidrográficas no laboratório de hidrologia florestal Walter Emmerich, Cunha - SP. **Revista do Instituto Florestal de São Paulo**, São Paulo, v.9, n.2, p.153-70, 1997.
- BRASIL. Lei n 9433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a PNRH, cria o SINGREH, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 9 jan. 1997.
- BRASIL. Decreto Nº 9.578, de 22 de novembro de 2018. Consolida atos normativos editados pelo Poder Executivo federal que dispõem sobre o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima, de que trata a Lei nº 12.114, de 9 de dezembro de 2009, e a Política Nacional sobre Mudança do Clima, de que trata a Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. **Diário Oficial da União**. Brasília, DF, 22 nov. 2018.
- CHAVES, H. M. L.; PIAU, L. P. Efeito da variabilidade da precipitação pluvial e do uso e manejo do solo sobre o escoamento superficial e o aporte de sedimento de uma bacia hidrográfica do Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 333-343, 2008.

CHAVES, H.M.L.; LORENA, D.R. Assessing reservoir reliability using classical and long-memory statistics. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 26, n. 100641, 2019.

COOPERAÇÃO ALEMÃ PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (GIZ) GmbH. **Adaptação baseada em Ecossistemas (AbE)**. Meio ambiente e Mudança do clima. 2015. Disponível em < <https://pmma.etc.br/?mdocs-file=1335> >. Acesso em 20 nov. 2019.

CODEPLAN – Companhia de Planejamento do Distrito Federal. **Texto para discussão: a crise e o consumo de água em Brasília**. n.39. Distrito Federal, 2018. 26 p.

COSTA, H.C. et al. Espacialização e sazonalidade da precipitação pluviométrica do estado de Goiás e Distrito Federal. **Revista Brasileira de Geografia Física** 01. 87-100, 2012.

DINIZ, F. S. **A crise hídrica do sistema descoberto-Distrito Federal no triênio 2015-2017**. Dissertação (mestrado) – Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Brasília-DF, 2019.

DO CARMO, M. S., et al. Geoquímica das águas da bacia Hidrográfica do rio Descoberto, Brasília/DF-Brasil. **Química Nova**, v. 28, n. 4, p. 565, 2005.

D'ORIA, M. et al. *Assessment of Local Climate Change: Historical Trends and RCM Multi-Model Projections Over the Salento Area (Italy)*. **Water**, v. 10, n. 8, p. 978, 2018.

FUNDAÇÃO GRUPO BOTICÁRIO, Adaptação baseada em Ecossistemas: Oportunidades para Políticas Públicas em Mudanças Climáticas. Documento, 2015. Disponível em: <http://www.fundacaogrupoboticario.org.br/layouts/FundacaoWebpartLibrary/Download.aspx?file=L3B0L011ZGFuY2FDdGltYXRpY2FBbmV4by9BYkVfMjAxNS5wZGY=> Acesso: 20 nov. 2019

GARDNER, L. R. Assessing the effect of climate change on mean annual runoff. **Journal of Hydrology**, v. 379, n. 3-4, p. 351-359, 2009.

HARRIS, I. P. D. J. et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3. 10 Dataset. **International journal of climatology**, v. 34, n. 3, p. 623-642, 2014.

HOLLAND, H. D. The chemistry of the atmosphere and oceans. **Wiley Interscience**. New York, 1978.

HOFFMANN, W.A.; JACKSON, R.B. Vegetation–climate feedbacks in the conversion of tropical savanna to grassland. **Journal of Climate**, v. 13, n. 9, p. 1593-1602, 2000.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2014: synthesis report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). “What is a GCM?” **Data Distribution Centre**, 2015. Disponível em: <[https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm\\_guide.html](https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html)> Acesso em 19 nov. 2019

HUTJES, R. W. A. et al. Biospheric aspects of the hydrological cycle. **Journal of Hydrology**, v. 212, p. 1-21, 1998.

JUNIOR, M., et al. Thornthwaite Climate Classification for Brazil Under IPCC-AR5 Climate Change Scenarios. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 4, p. 647-664, 2018.

LIMA, J. E. F. W. Situação e perspectivas sobre as águas do cerrado. **Ciência e Cultura**, v. 63, n. 3, p. 27-29, 2011.

MINUZZI, Rosandro B. et al. El Niño: ocorrência e duração dos veranicos do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 364-371, 2005.

MORAIS, D. C., et al. Priorização de áreas de controle de perdas em redes de distribuição de água. **Pesquisa Operacional**, v. 30, n. 1, p. 15–32, 2010

MOSS, R. et al. Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies. **Technical Summary**. Genebra: IPCC, 2008.



NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH (NCAR) - "What is downscaling? - Climate Change Scenarios", 2019. Disponível em: <<https://gisclimatechange.ucar.edu/question/63>> Acesso em 25 nov. 2019

PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W. Climate change impacts on river Quaraí flow. **Climate and Water Resources Modelling**, edited by: Fung, CF, Lopez, A., and New, M., John Willey & Sons, 2010.

PRITCHETT, W. L. Properties and Management of Forest Soils. John Wiley, New York, 500p, 1979.

PRUSKI, F. F., et al. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 301-307, 2001.

SANTOS, T. V. M. N. dos. **Mapeamento de áreas prioritárias para ações de conservação e recuperação ambiental na Bacia do Rio Descoberto**. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SILVA, B. E. S., et al. Tendência e Projeção da Temperatura do Ar para o Estado de Goiás. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, n. 51, p. 28, 2018.

SILVA, P. S. et al. Impacts of the 1.5° C global warming target on future burned area in the Brazilian Cerrado. **Forest Ecology and Management**, v. 446, p. 193-203, 2019.

SILVEIRA, C. S., et al. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre a região nordeste do Brasil, Amazônia e bacia da prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, 2013.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. São Paulo: EDUSP, 2001. p 35-51.

SIMONOVIC, S. P. **Managing water resources: methods and tools for a systems approach**. Londres: UNESCO, 2009.

SPERA, S.T. et al. Aptidão agrícola das terras da bacia hidrográfica do Ribeirão Taguatinga, Distrito Federal. **Embrapa Cerrados-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**, 2004.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 2, n. 1, p. 135-152, 1997.

TUCCI, C. E. M. Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos. **Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas–Câmara Temática de Recursos Hídricos, Brasília**, 2002.

TUCCI, C. E. M. Regionalização de vazões. Rio Grande do Sul: Ed. Universidade/UFRGS, 2002. p.14

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos avançados**, v. 22, n. 63, p. 7–16, 2008.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Paris Agreement**, 2015.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 72p., 2004.

VAZ, C. M. **Análise de tendência em séries de precipitação diária máxima anual**. 2008. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2008.

ZULLO, J., et al. Sugar-energy sector vulnerability under CMIP5 projections in the Brazilian central-southern macro-region. **Climatic change**, v. 149, n. 3-4, p. 489-502, 2018.

## 9. APÊNDICES

### 9.1 Apêndice A

#### **Mudanças médias na temperatura e precipitação para a bacia do Rio Descoberto no período 2020-2039, geradas por um conjunto de 16 modelos GCMs do CMIP5.**

As figuras abaixo apresentam as estimativas das projeções individuais de cada modelo separadas pelos diferentes cenários RCP. Em sua maioria, os resultados apontam que a temperatura possui tendência ao aumento (entre +0,5 a +4°C) em todos os cenários para todos os modelos.

- O modelo (mri\_cgm3) foi o único que apresentou tendência a diminuição da temperatura para o período de 2020 a 2039, apresentando os valores de -0.69°C para o cenário 2.6, -0.83°C para os cenários 4.5 e 6.0 e -0.6°C para o cenário 8.5.
- Quanto a variável precipitação, observa-se que não há concordância entre os modelos se esta irá aumentar ou diminuir no período futuro. Observa-se que o modelo miroc5, por exemplo, estima que caso a temperatura aumente 1°C a precipitação pode aumentar entre 81 a 85%, em todos os cenários.
- Os modelos bcc\_csm1\_1 e csiro\_mk3\_6\_0 também apresentaram tendências de aumento de temperatura (entre 1,3 e 1,8°C) concomitante a um aumento de precipitação (entre 8 e 13%) em todos os cenários.
- Os demais 12 modelos apresentaram projeções de diminuição da precipitação em todos os cenários, variando de -2% a -60%.

